



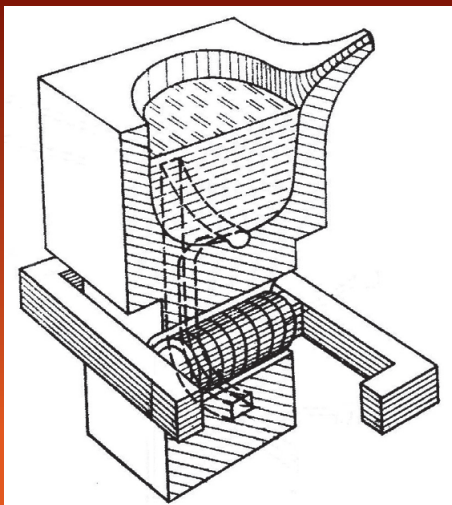
Уральский  
федеральный  
университет

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Институт  
материаловедения  
и металлургии

# КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Учебно-методическое пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

## КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

*Рекомендовано учебно-методическим советом  
института материаловедения и металлургии УрФУ  
в качестве **учебно-методического пособия** для студентов,  
обучающихся по направлениям подготовки металлургического профиля*

Екатеринбург  
Уральский федеральный университет  
2014

УДК 621.365.5(075.8)  
ББК 31.292-5я73  
К64

Авторы:

С. В. Карелов, В. И. Матюхин, О. В. Матюхин, Б. А. Сокунов,  
Л. С. Грובה

Рецензенты:

завлабораторией пирометаллургии черных металлов ФГБУН ИМЕТ  
д-р техн. наук *О. Ю. Шешуков*

проф., д-р техн. наук *Г. М. Дружинин* (НИИ Metallургической теп-  
лотехники ОАО «ВНИИМТ»)

Научный редактор – проф. *С. Н. Гуцин*

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ ПЛА-  
К64 ВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ : учебное пособие / С. В. Карелов [и др.]. –  
Екатеринбург : УрФУ, 2014. – 162, [2] с.  
ISBN 978-5-321-02376-1

В пособии рассмотрены принципы действия, конструкция и на-  
значение индукционных плавильных печей. Содержит справочный  
материал, необходимый для проведения электрического расчета  
индукционной канальной и тигельной печей, представлена методика их  
электрического расчета. Приведены примеры поэтапного расчета  
индукционной канальной и тигельной печи, иллюстрирующие отдельные  
этапы инженерного электрического расчета. В приложении приведены за-  
дания для выполнения курсовой работы.

Библиогр.: 30 назв. Табл. 16. Рис. 52. Прил. 1.

УДК 621.365.5(075.8)  
ББК 31.292-5я73

ISBN 978-5-321-02376-1

© Уральский федеральный универ-  
ситет, издательское оформление,  
2014

© С. В. Карелов, В. М. Матюхин,  
О. В. Матюхин, Б. А. Сокунов,  
Л. С. Грובה, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Существующая потребность современной техники в специальных сталях и сплавах определяет развитие специальной электрометаллургии как отрасли по производству черных и цветных металлов, что вызывает необходимость создания новых и совершенствование существующих электротермических агрегатов.

Технико-экономические предпосылки применения электронагрева в промышленности связаны с тем, что ряд технологических процессов практически невозможно осуществить без электронагрева. Целесообразность его применения определяется значимостью получаемой продукции, величину экономического эффекта подсчитывают по отношению к отрасли без электронагрева.

Использование электронагрева позволяет получать продукцию более высокого качества и обеспечивать (при прочих равных условиях) улучшенные экологичные условия производства. Простота подачи электрической энергии, технологичность ее применения и относительная простота регулирования подводимой мощности делают этот вид энергии незаменимым при получении жидкого металла высокого качества.

Возможность работы электротехнологических установок с регулируемой атмосферой и под глубоким вакуумом, возможность концентрации значительной энергии в относительно малом объеме, позволяющей достигать высоких скоростей нагрева и высоких значений температуры, обеспечение практически любого распределения температур в рабочем пространстве печи, отсутствие газообразных продуктов сгорания, способствующих получению максимального коэффициента использования энергии и КПД электроустановки указывают на теплотехнические преимущества электротеплогенерации. В то же время относительно высокая стоимость электроэнергии, значительные капитальные затраты, связанные с использованием сложного оборудования (электро-установка, собственно печь, кабель, трансформатор, преобразователь и др.), относительно невысокая долговечность и надежность основного оборудования, а также повышенный расход дорогих и дефицитных материалов требуют тщательного технико-экономического обоснования применения электрического нагрева.

Установки, в которых происходит превращение электрической энергии в другие виды энергии с одновременным осуществлением



технологических процессов, в результате которых изменяются свойства исходного вещества, называют *электротехнологическими*.

В электротехнологических процессах используют свойства самих обрабатываемых веществ и материалов: электропроводность, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость, теплопроводность, теплоемкость [1].

В тех случаях, когда по каким-либо причинам (технологические или электрические) контакт нагреваемого тела с электрической цепью невозможен, с помощью переменного электромагнитного поля можно внутри проводников индуцировать вихревые токи проводимости. Такой индукционный подвод энергии осуществляется переменным током высокой или повышенной частоты.

При индукционном нагреве переменный электрический ток пропускают через индуктор, представляющий собой многовитковую катушку, выполненную из металлического провода. В результате этого вокруг проводника формируется изменяющееся во времени магнитное поле определенной напряженности. При размещении нагреваемого тела либо внутри обмотки индуктора, либо рядом с ним образующийся изменяющийся поток магнитной индукции пронизывает его и индуцирует электрическое поле. Под действием электрического поля в обрабатываемом проводнике возникают вихревые токи, которые увеличивают внутреннюю энергию обрабатываемого материала с увеличением его температуры.

*Индукционными установками* называют электротермические устройства, предназначенные для индукционного нагрева или плавки тех или иных материалов, включающие весь комплекс устройств, которые обеспечивают осуществление электротехнологического процесса, включая источники питания, устройства автоматики и управления, комплектующее оборудование, токоподводы, некоторые вспомогательные устройства и т. п. Они предназначены для плавки черных, цветных и благородных металлов; получения высококачественных сталей и специальных сплавов, требующих особой чистоты, однородности и точности химического состава.

Часть индукционной установки, в которой нагреваемый металл или сплав доводится до температуры плавления, т. е. до условий, при котором он меняет свое агрегатное состояние в процессе нагрева, называется *индукционной плавильной печью* (*индукционная единица*), которая включает в себя индуктор, каркас, камеру для

плавки, а также механизмы наклона печи, вакуумную систему и др., в которой происходят процессы теплогенерации, расплавления материалов и придания им определенных свойств (химический состав, температура и др.).

## **1. ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННЫХ КАНАЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

### **1.1. История развития процесса индукционного нагрева**

В течение XIX в. были сделаны открытия, составляющие основу современной электротехники индукционного нагрева.

В 1802 г. русским ученым В. В. Петровым (1761–1834) было открыто явление электрической дуги; этот год по праву считается датой рождения электротермии вообще и отечественной электротермии в частности. Первый патент на производство стали электроплавильным способом был выдан во Франции в 1853 г., а первую лабораторную дуговую печь создал француз Анри Муассон в 1892 г. Промышленный же вариант дуговой печи был создан только в 1899 г. французом Полем Геру.

В 1831 г. английским ученым Майклом Фарадеем был открыт закон электромагнитной индукции. Русский ученый Ленц и англичанин Джоуль независимо друг от друга установили, что прохождение тока по проводнику сопровождается выделением тепла; Леон Фуко подробно исследовал частный случай этого явления с наведением тока в сплошных металлических средах. В середине XIX в. англичанин Джеймс Максвелл получил основополагающие уравнения электромагнитного поля и построил систему современной электродинамики. В 80-х гг. того же века У. Томсон открыл и исследовал поверхностный эффект, заключающийся в том, что переменный ток вытесняется к поверхности проводника.

Промышленное использование электрической энергии для плавки и нагрева металлов и сплавов началось лишь спустя много лет, т. к. для этого необходимо было соответствующее развитие электротехники и энергетического хозяйства. Выдающуюся роль в развитии этих областей науки сыграли русские ученые и практики: П. Н. Яблочков, И. Ф. Усагин и М. О. Доливо-Добровольский – исследованиями в области трансформаторов, а также работы

М. О. Доливо-Добровольского, впервые осуществившего передачу электроэнергии на расстояние.

Опытная индукционная печь с открытым горизонтальным каналом была построена в Англии в 1887 г. В 1900–1901 гг. в Швеции появилась первая промышленная индукционная печь (рис. 1.1 [2]) с магнитопроводом и открытым каналом, предназначенная для выплавки стали.

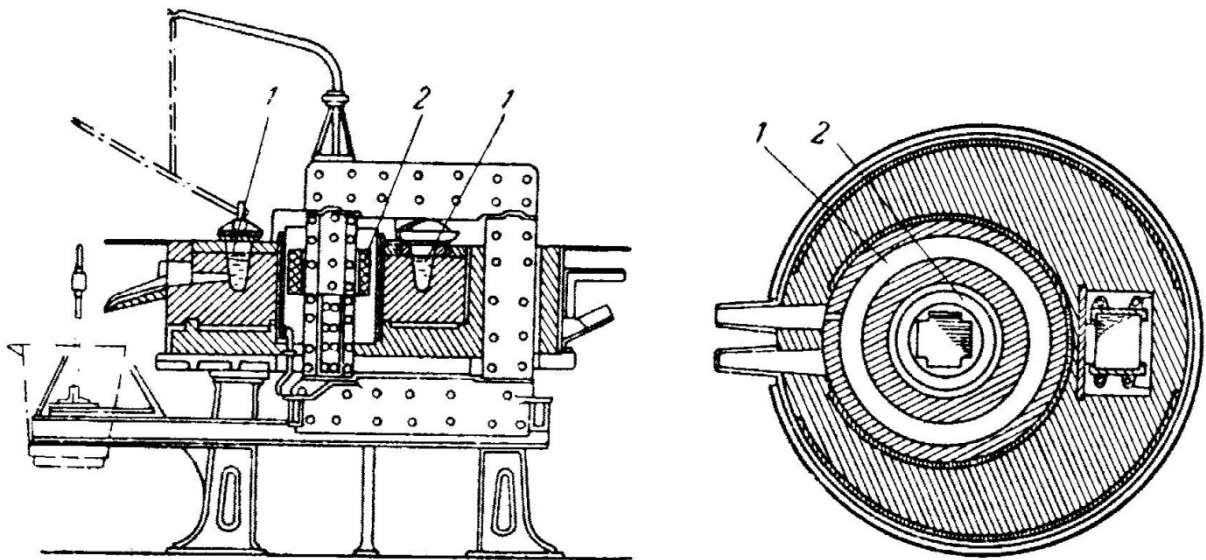


Рис. 1.1. Индукционная печь с открытым горизонтальным каналом:  
1 – кольцевой желоб; 2 – индуктор

Весь расплавленный металл помещался в кольцевом желобе 1, который при емкости печи порядка 1 т имел значительные размеры. Для охлаждения индуктора 2 и сердечника в зазор между индуктором и стенкой желоба специальным вентилятором вдувался воздух.

После этого промышленная электротермия и электропечестроение получили за рубежом широкое развитие. В 1906–1907 гг. появилась печь Рехлинг–Роденгаузера. Эта печь имела два индуктора и два окружавших их канала, которые, соединяясь в средней части, образовывали общую ванну, вмещающую основную массу металла.

Появившиеся в 1916 г. печи нового типа (рис. 1.2), предложенные Уайтом, представляли собой решительный шаг вперед, после которого начался быстрый рост применения канальных индукционных печей. Эти печи отличаются тем, что вместо открытого желоба с металлом, характерного для первых их конструкций, пла-

вильные агрегаты нового типа имели вертикальный канал 1, проходящий в огнеупорном массиве 2, называемом *подовым камнем*.

Устья канала входят в дно ванны 3, где помещается вся масса расплавленного металла. Индуктор 4 находится в цилиндрическом проеме подового камня. Индуктор и внутренние стенки подового камня для охлаждения обдуваются вентилятором 5.

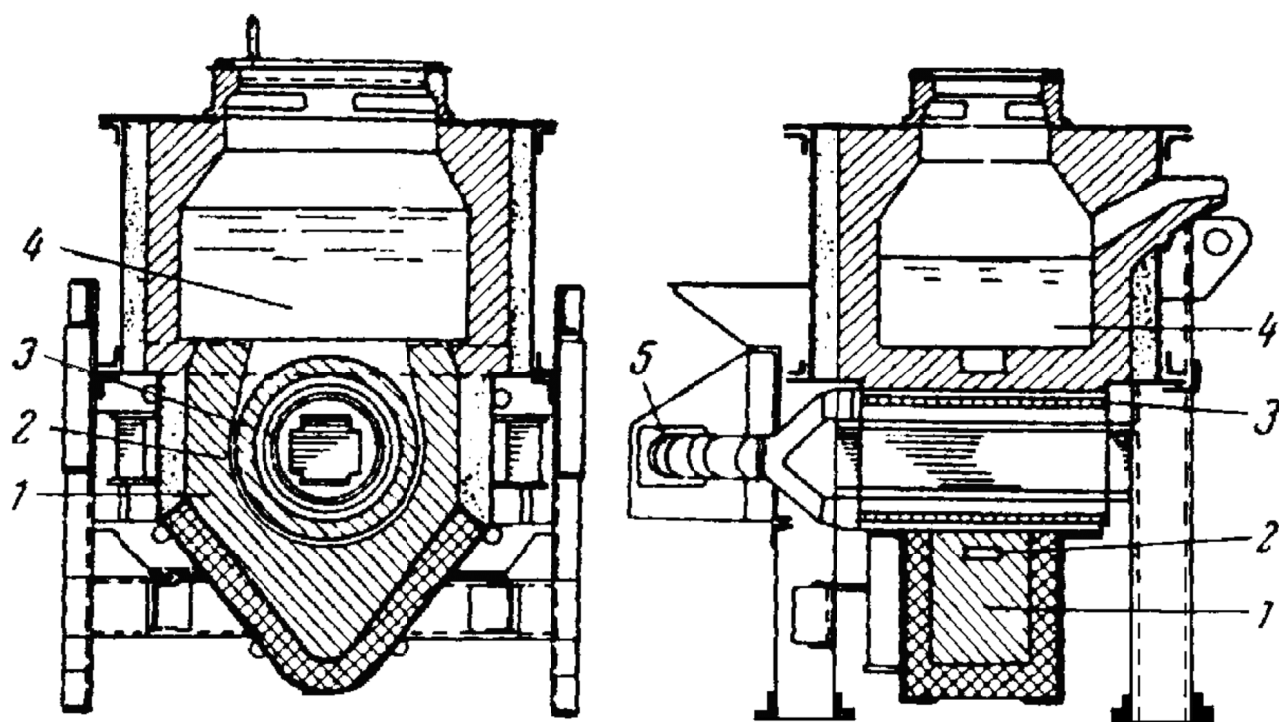


Рис. 1.2. Индукционная печь  
с закрытым вертикальным каналом системы Уайта:  
1 – вертикальный канал; 2 – подовый камень;  
3 – дно ванны; 4 – индуктор; 5 – подача воздушного дутья

В нашей стране такие печи начали строить в 30-х гг. XX в. на Московском электрозаводе. Большую роль в разработке и проектировании этих печей сыграло ОКБ треста «Электропечь», преобразованное в 1961 г. во ВНИПКТИ электротермического оборудования (ВНИИЭТО), который являлся ведущим в этой области.

Первая попытка дать систематизированный и обоснованный метод электрического расчета индукционных канальных печей (с магнитопроводом) была сделана в 1933 г. [3].

Значительный интерес представляет зарубежный опыт в области проектирования установок и эксплуатации индукционных пе-

чей, накопленный одной из крупнейших мировых фирм Brown Boveri und Cie Aktiengesellschaft и отраженный в книге К. Брокмайера «Индукционные плавильные печи» [4].

Существенный вклад в развитие теории и практики индукционного нагрева внесен отечественными учеными В. П. Вологдиным, Г. И. Бабатом, М. Г. Лозинским, А. Е. Слухоцким, А. В. Донским, К. З. Шепеляковским, А. М. Вайнбергом, С. А. Фарбманом, И. Ф. Колобневым и др.

## **1.2. Принцип действия индукционной канальной печи**

Принцип действия индукционной канальной печи подобен принципу действия силового трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания. Однако электрические параметры канальной электропечи и обычного трансформатора заметно отличаются. Это вызвано различием их конструкций. Канальная печь состоит (рис. 1.3) [5] из футерованной ванны 2, в которой помещается почти вся масса расплавляемого металла 3, и находящейся под ванной индукционной единицы. Ванна сообщается с плавильным каналом 5, также заполненным расплавом. Расплав в канале и прилегающем участке ванны образует замкнутое проводящее кольцо.

Система индуктор-магнитопровод называется *печным трансформатором*. Футеровка, образующая плавильный канал, называется *подовым камнем*. Подовый камень 6 представляет собой огнеупорный массив с цилиндрическим проемом 7, в который вставляется индуктор 4, навитый на стержень замкнутого магнитопровода 1.

Индукционная единица объединяет печной трансформатор и подовый камень с каналом. Индуктор является первичной обмоткой трансформатора, а роль вторичного витка выполняет расплавленный металл, заполняющий канал и находящийся в нижней части ванны.

Ток, протекающий во вторичной цепи, вызывает нагрев расплава. При этом почти вся энергия выделяется в канале, имеющем малое сечение (в канале поглощается 90–95 % подведенной к печи электрической энергии). Металл нагревается за счет тепло- и массообмена между каналом и ванной. Перемещение металла в печи обусловлено главным образом электродинамическими усилиями, возникающими в канале, и в меньшей степени конвекцией, связан-

ной с перегревом металла в канале по отношению к ванне. Перегрев расплава ограничивается некоторым значением допускаемой мощности, подводимой к установке.

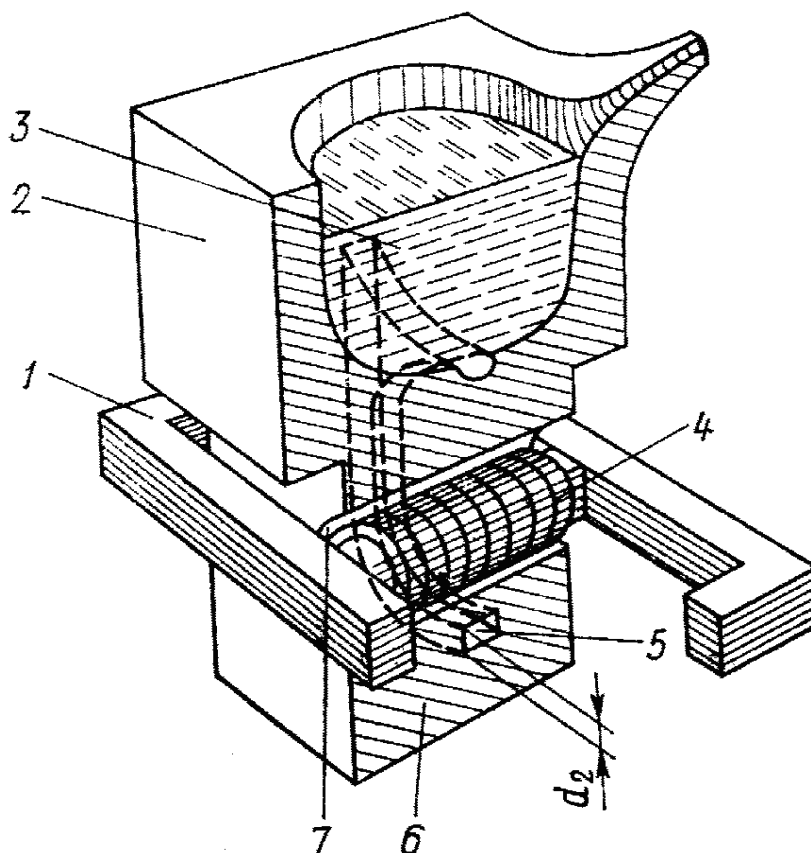


Рис. 1.3. Устройство индукционной канальной печи шахтного типа:

1 – замкнутый магнитопровод; 2 – футерованная ванна;  
3 – расплавленный металл; 4 – индуктор; 5 – плавильный канал;  
6 – подовый камень; 7 – цилиндрический проем

Принцип действия канальной печи требует постоянно замкнутой вторичной цепи, поэтому допускается лишь частичный слив расплавленного металла и дозагрузка соответствующего количества новой шихты. Все канальные печи работают с остаточной емкостью расплава, составляющей обычно 20–50 % полной емкости печи и обеспечивающей постоянное заполнение канала жидким металлом. Замораживания металла в канале не допускается. Во время межплавочного простоя металл в канале должен поддерживаться в расплавленном состоянии.

Индукционная канальная печь имеет следующие отличия от силовых трансформаторов:

1) вторичная обмотка совмещена с нагрузкой и имеет только один виток  $N_2$  с относительно малой высотой, в отличие от высоты первичной обмотки с числом витков  $N_1$  (рис. 1.4). Основные уравнения, описывающие работу индукционной канальной печи, (уравнение токов и уравнения электрического состояния) аналогичны уравнениям для трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания (отсутствует напряжение  $U_2$ ):

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + (-\dot{I}_2); \\ U_1 &= (-\dot{E}_1) + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1; \\ E'_2 &= R'_2 \dot{I}_2 + jX'_2 \dot{I}_2.\end{aligned}$$

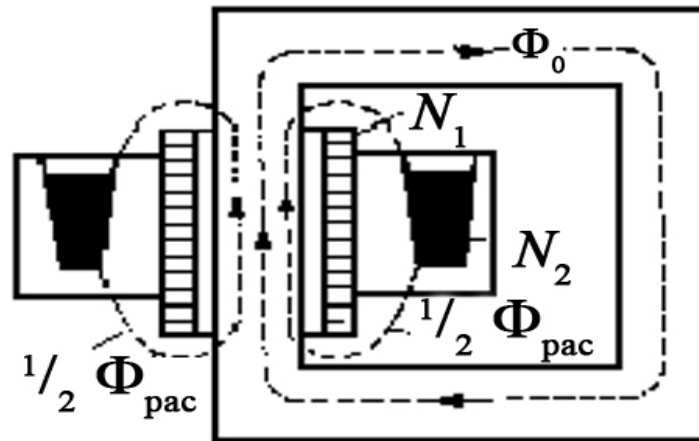


Рис. 1.4. Принципиальная схема индукционного нагрева в канальной печи

2) вторичный виток — канал — находится от индуктора на относительно большом расстоянии, т. к. отделен от него не только электрической, но и тепловой изоляцией (воздушным зазором и футеровкой). В связи с этим магнитные потоки рассеяния индуктора и канала значительно превышают потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток обычного силового трансформатора той же мощности. Поэтому значения реактивных сопротивлений рассеяния индукционной канальной печи выше, чем у трансформатора. Это, в свою очередь, приводит к тому, что энергетические показатели индукционной канальной печи (электрический коэффициент полезного действия и коэффициент мощности) заметно ниже, чем у обычного трансформатора.

Интенсивное движение расплавленного металла из каналов в ванну и обратно имеет важнейшее значение, т. к. почти все тепло индукционного нагрева выделяется в каналах. В возникновении циркуляции металла некоторую роль играет конвекция, связанная с перегревом металла в каналах, но основным фактором циркуляции металла является электродинамическое взаимодействие тока в канале с магнитным потоком рассеяния, проходящим между каналом и индуктором (рис. 1.5).

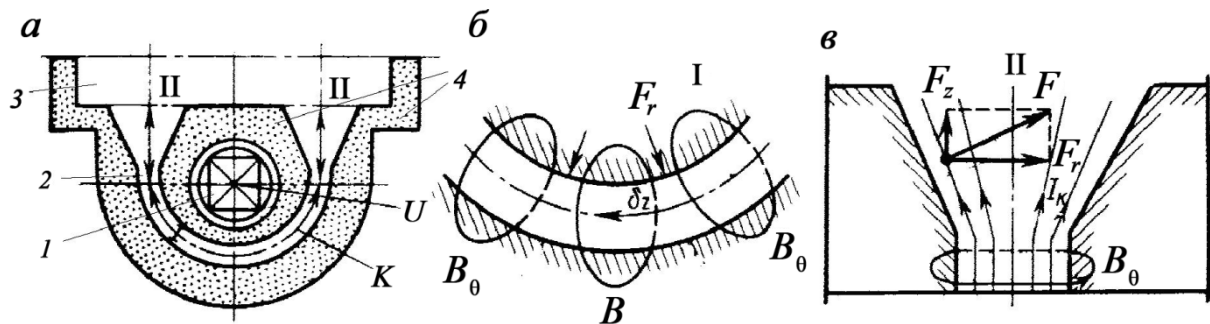


Рис. 1.5. Схема взаимодействия тока канала с магнитным полем:

*a, б* – в канале;

*1* – индуктор; *2* – канал с жидким металлом; *3* – металлическая ванна; *4* – футеровка;

*в* – на поверхности металла

Электродинамические силы  $F_r$  направлены от индуктора и к металлу в канале  $K$  при осевом направлении плотности тока в канале  $\delta_z$ . Создаваемое ими давление равно нулю на внутренней поверхности канала и максимально на его наружной поверхности. Вследствие этого металл вытесняется в ванну из устья канала вдоль его наружной стенки и всасывается в канал вдоль его внутренней стенки (рис. 1.5, б). Для усиления циркуляции расплава устьям каналов придают округлую форму, обеспечивающую минимальное гидравлическое сопротивление (рис. 1.5, а, 1.6). В тех случаях, когда необходимо ослабить циркуляцию (например, при плавке алюминия), устье делают без расширения с повышенным гидравлическим сопротивлением.

Сквозное однонаправленное движение металла через канал и ванну вместо симметричной циркуляции позволяет усилить тепло- и массообмен, уменьшить перегрев металла в каналах и за счет этого увеличить стойкость подового камня. Для обеспечения такого



движения металла были предложены различные технические решения [6]: винтовой канал с устьями, выходящими в ванну на разной высоте, что резко усиливает конвекцию; каналы переменного сечения, в которых имеется не только радиальная (обжимающая), но и осевая составляющая сил электродинамического взаимодействия тока в канале с собственным магнитным полем; дополнительный электромагнит для создания электродинамической силы, перемещающей металл вверх по центральному каналу сдвоенной индукционной единицы (рис. 1.7).

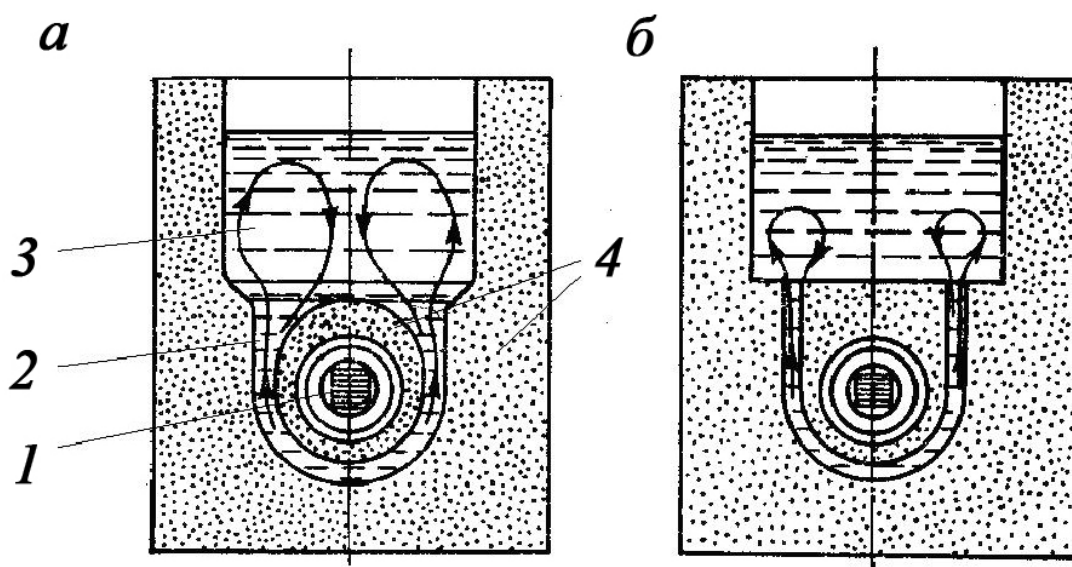


Рис. 1.6. Циркуляция металла канальной печи:  
1 – индуктор; 2 – канал с жидким металлом; 3 – ванна с расплавом;  
4 – футеровка; а, б – сечение канала

Применение винтовых каналов и каналов переменного сечения на одноканальных единицах себя не оправдало. Использование дополнительного электромагнита связано с усложнением и удорожанием печи и потому нашло лишь ограниченное применение. Использование каналов с устьями переменного сечения на сдвоенных индукционных единицах обеспечило получение положительного результата. В сдвоенной единице с различной формой центрального и боковых устьев наблюдается однонаправленное движение металла, особенно интенсивное при отсутствии фазового сдвига между магнитными потоками индукторов. Такие единицы, применяемые на практике, обеспечивают удвоение срока службы футеровки.

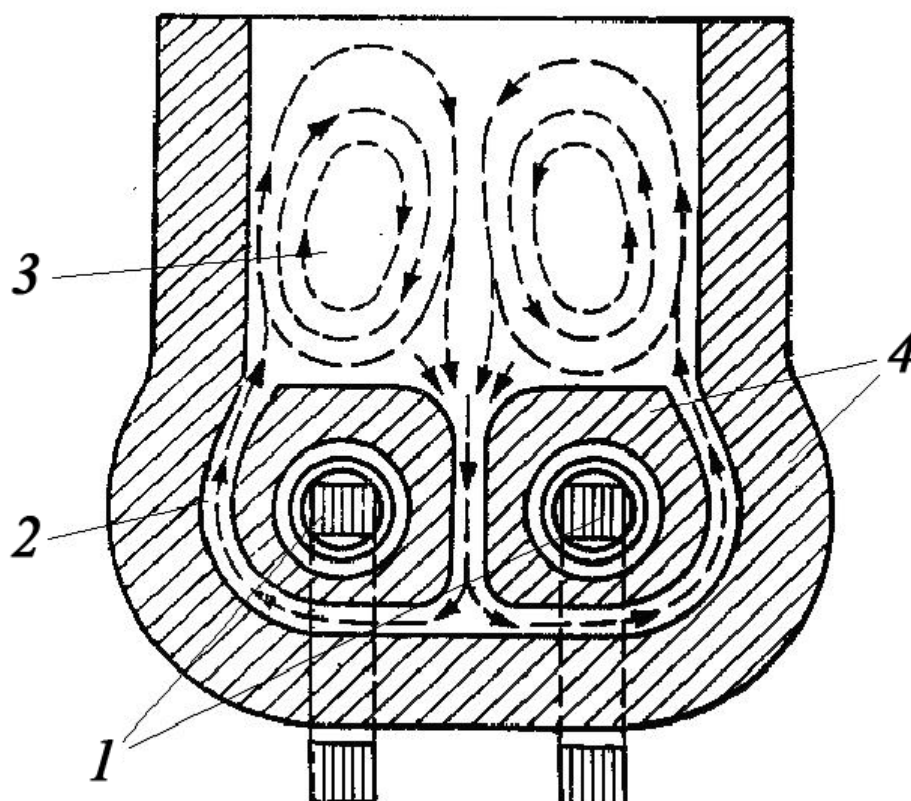


Рис. 1.7. Сдвоенная индукционная единица  
с однонаправленным движением металла в каналах:

1 – индуктор; 2 – канал с жидким металлом;  
3 – ванная с расплавом; 4 – футеровка

### 1.3. Конструкции индукционных канальных печей

При большом разнообразии типов индукционных канальных печей их основные конструктивные узлы являются общими для всех разновидностей: трансформатор печи, футеровка, корпус, вентиляционная установка, механизм наклона (рис. 1.8, 1.9).

Схема *трансформатора печи*, элементами которого являются магнитопровод, индуктор, канал, определяется конструкцией печи.

Печи с одной индукционной единицей имеют однофазный трансформатор с броневым магнитопроводом. Широко применяют также трансформаторы со стержневыми магнитопроводами. Напряжение на первичную обмотку (индуктор) подают от питающего автотрансформатора с большим числом ступеней напряжения, что позволяет регулировать мощность печи. Автотрансформатор включается в линейное напряжение цеховой сети.

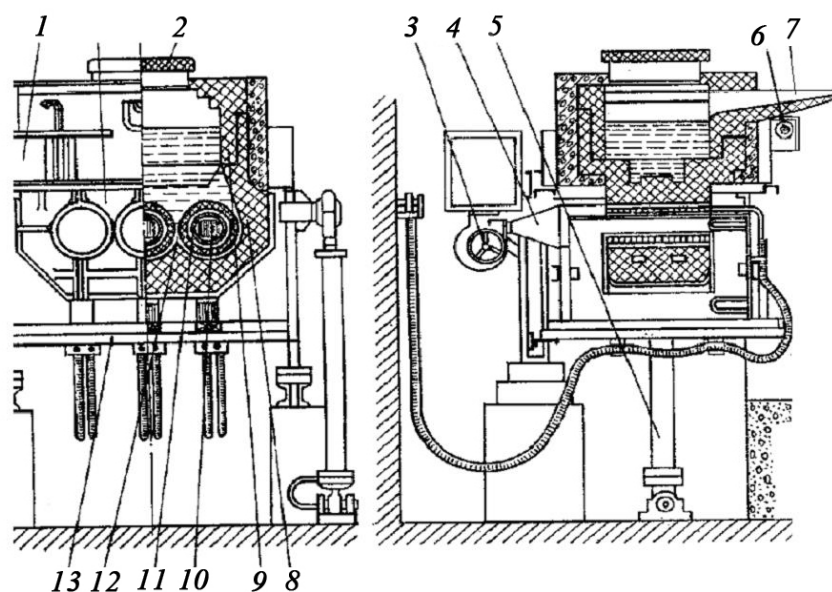


Рис. 1.8. Индукционная канальная печь для плавки медных сплавов с трехфазной индукционной единицей (шахтного типа):

- 1, 7 – корпус; 2 – крышка; 3, 5 – механизм наклона;  
4, 6 – вентиляционная установка;  
8, 9 – футеровка; 10–12 – трансформатор печи

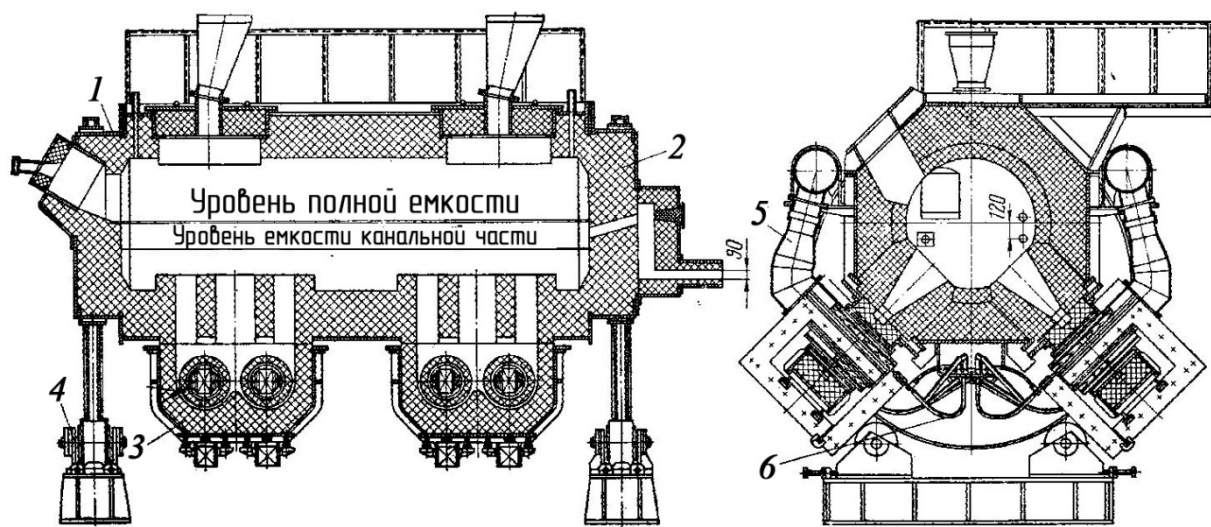


Рис. 1.9. Индукционная канальная печь (барабанного типа) со сдвоенной индукционной единицей:

- 1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – индукционная единица; 4 – механизм поворота;  
5 – воздушное охлаждение футеровки канальной части;  
6 – подвод тока и воды к индукторам

Печь со сдвоенной индукционной единицей (рис. 1.10) [7] имеет двухфазную нагрузку, как и печь с двумя отдельными однофазными индукционными единицами. Индукторы в двухфазной системе подключаются к трехфазной сети по схеме открытого треугольника.

Конструктивно сведенная единица состоит из двух трансформаторов стержневого типа.

Печь с трехфазной индукционной единицей может иметь трехфазный трансформатор или три однофазных трансформатора. Последнее предпочтительнее, несмотря на большую массу магнитопровода, т. к. три однофазных трансформатора обеспечивают более удобную сборку и разборку конструкции печи, которые приходится периодически производить при смене футеровки.

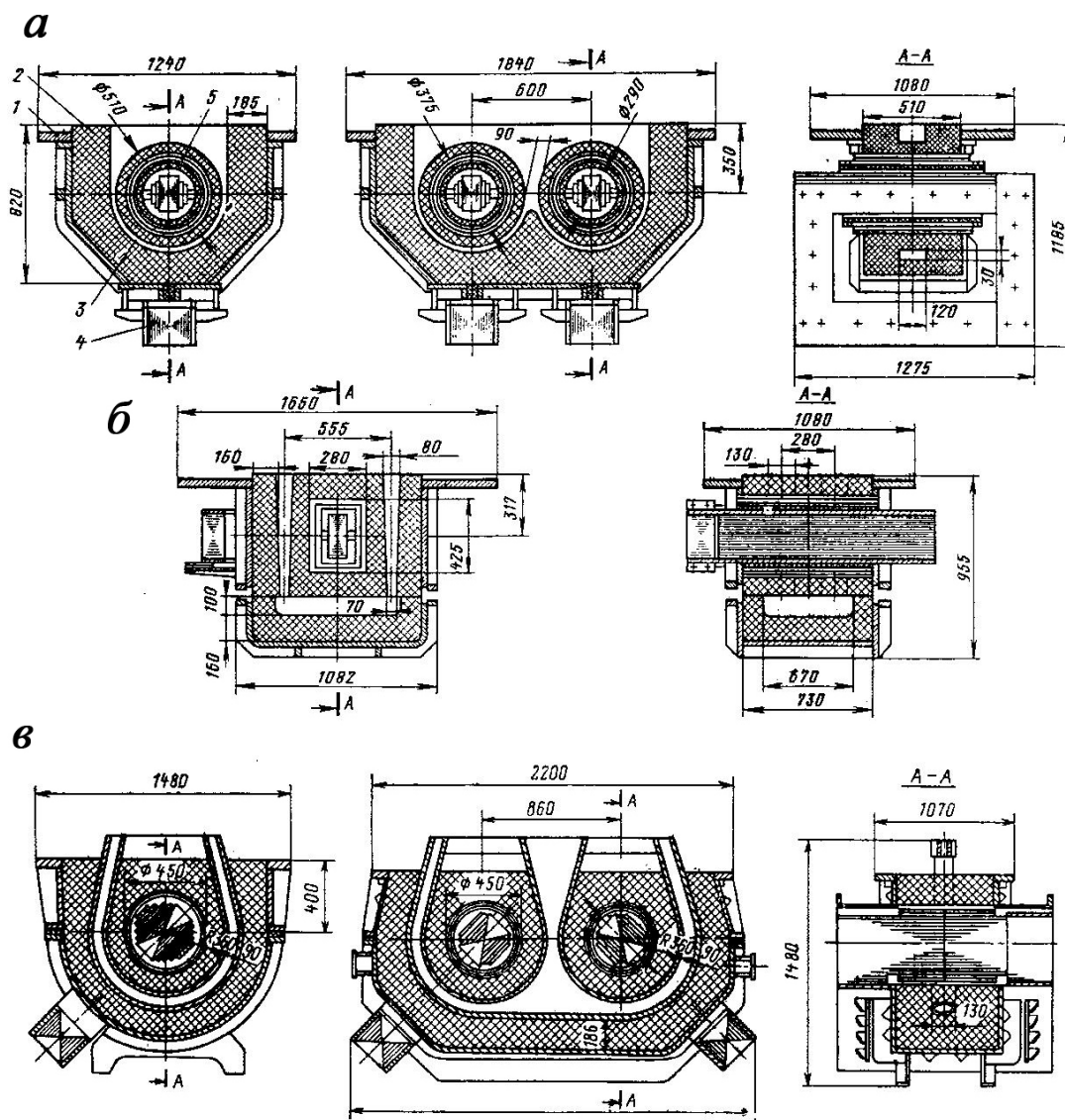


Рис. 1.10. Типовые унифицированные

индукционные единицы канальных печей:

а – для печей плавки латуни однофазной единицы 350 кВт,  
со сведенной единицей – 600 и 700 кВт:

1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – канал; 4 – магнитопровод; 5 – индуктор;

б – для печей (мощность 400 кВт); в – для печей плавки чугуна  
(мощность 500 кВт – однофазная единица и 1000 кВт – сведенная единица)

Трехфазные индукционные единицы или группы однофазных единиц, число которых кратно трем, позволяют более равномерно загрузить питающую сеть. Питание многофазных печей осуществляется через регулировочные автотрансформаторы.

*Магнитопровод* трансформатора печи изготавливают из листовой электротехнической стали. Его выполняют съемным для обеспечения возможности регулярной сборки и разборки.

Форма поперечного сечения стержня при небольшой мощности трансформатора квадратная или прямоугольная, а при значительной мощности крестообразная или ступенчатая.

Индуктор представляет собой выполненную из медного провода спиральную катушку. Как правило, катушка индуктора имеет круглое поперечное сечение. Однако в печах, имеющих прямоугольный контур плавильного канала, катушка индуктора может повторять его форму. Полученный из электрического расчета диаметр индуктора определяет размеры располагаемого внутри него сердечника.

Печной трансформатор, находясь в непосредственной близости от ванны расплавленного металла, работает в тяжелых температурных условиях. Он нагревается не только за счет электрических потерь в меди и стали, как обычный трансформатор, но и за счет тепловых потерь через футеровку плавильного канала. Поэтому всегда применяют форсированное охлаждение печного трансформатора.

Индуктор канальной печи имеет принудительное воздушное или водяное охлаждение. При воздушном охлаждении индуктор изготавливают из медного обмоточного провода прямоугольного сечения. Средняя плотность используемого тока в нем составляет 2,5–4 А/мм<sup>2</sup>. При водяном охлаждении индуктора, изготовленного из профилированной медной трубки с толщиной рабочей стенки (обращенной к каналу) 10–15 мм, средняя плотность тока достигает 20 А/мм<sup>2</sup>. Индуктор, как правило, выполняют с однослойным размещением медной трубки, в редких случаях – с двухслойным. Последний вариант конструктивно значительно сложнее и имеет более низкий коэффициент мощности.

Номинальное напряжение на индукторе не превышает 1000 В, но наиболее часто соответствует стандартному напряжению сети (220, 380 или 500 В). Витковое напряжение при малой мощности индукционной единицы составляет 7–10 В, а при большой

мощности его увеличивают до 13–20 В. Используемая форма витков индуктора обычно круговая, лишь у печей для плавки алюминия, каналы которых состоят из прямолинейных отрезков, а сердечник всегда имеет прямоугольное сечение, витки индуктора делаются прямоугольными. Индуктор изолируют киперной, асбестовой лентой или лентой из стекловолокна. Между индуктором и сердечником расположен изолирующий цилиндр толщиной 5–10 мм из бакелита или стеклотекстолита. Цилиндр фиксируют на сердечнике при помощи забиваемых деревянных клиньев.

Питание печи от специального регулируемого силового трансформатора осуществляют на нескольких крайних витках индуктора, делая на них отпайки. Подавая питающее напряжение на различные отпайки, можно менять коэффициент трансформации печного трансформатора и тем самым управлять выделяемой в канале тепловой мощностью.

### КОРПУС ПЕЧИ

Обычно корпус печи состоит из каркаса, кожуха ванны и кожуха индукционной единицы. Кожух ванны у печей малой емкости, а у барабанных печей значительной мощности, может быть выполнен достаточно прочным и жестким, что позволяет отказаться от каркаса. Конструкции и крепления корпуса должны быть рассчитаны на нагрузки, возникающие при наклоне печи, чтобы обеспечить необходимую жесткость в наклоненном положении.

Каркас изготавливают из стальных фасонных балок. Цапфы оси наклона опираются на подшипники, смонтированные на опорах, которые устанавливаются на фундаменте. Кожух ванны изготавливают из листовой стали толщиной 6–15 мм и снабжают ребрами жесткости.

Кожух индукционной единицы служит для соединения подового камня и печного трансформатора печи в единый конструктивный элемент. Двухкамерные печи не имеют отдельного кожуха индукционной единицы. Он составляет у них одно целое с кожухом ванны. Кожух индукционной единицы охватывает индуктор, поэтому для уменьшения потерь на вихревые токи его делают составным из двух половинок с изолирующей прокладкой между ними. Их стяжку производят болтами, снабженными изолирующими втулками и шайбами. Таким же образом кожух индукционной единицы крепят к кожуху ванны.

Кожух индукционных единиц может быть литым или сварным, часто имеет ребра жесткости. В качестве материала для кожухов предпочтительнее использовать немагнитные сплавы. Двухкамерные печи имеют один общий кожух ванны и индукционной единицы.

### ВЕНТИЛЯЦИОННАЯ УСТАНОВКА

В печах небольшой емкости, не имеющих водяного охлаждения, вентиляционная установка служит для отвода излишков тепла охлаждающим агентом (воздух) от индуктора и поверхности проема подового камня, нагреваемого в результате теплопередачи от расплавленного металла в близко расположенных каналах. Применение водоохлаждаемого индуктора не исключает необходимости вентилировать проем подового камня во избежание перегрева его поверхности. Хотя современные съемные индукционные единицы имеют не только водоохлаждаемые индукторы, но и водяное охлаждение кожухов и проемов подового камня (в проем вставляют водоохлаждаемый кессон), для повышения надежности индукционной канальной плавильной печи вентиляционная установка является *обязательным элементом* печного оборудования.

Вентиляторы с приводными двигателями часто устанавливают на каркасе печи. При этом вентилятор соединяют с коробом, распределяющим воздух по вентилируемым проемам, коротким жестким воздуховодом. Масса вентиляционной установки может быть значительной, что приводит к существенному увеличению нагрузки на механизм наклона печи. Поэтому применяют и другую компоновку, при которой вентиляторы устанавливают рядом с печью, соединяя с ней гибкими рукавами и обеспечивая возможность наклона установки. Вместо гибких рукавов может использоваться воздуховод, состоящий из двух жестких участков, сочленяющихся с помощью поворотного стыка на продолжении оси наклона для осуществления опрокидывания печи. При такой компоновке уменьшается нагрузка на механизм наклона, но усложняется конструкция воздуховодов и загромождается пространство вокруг печи.

Печи со съемными индукционными единицами оборудуют индивидуальными вентиляторами для охлаждения каждой единицы. Выход из строя вентилятора может привести к аварии печи. Поэтому вентиляционная установка должна иметь резервный

вентилятор, готовый к немедленному включению и отделенный от основного воздуховода задвижкой. Исключение составляют печи с индивидуальными вентиляторами на индукционных единицах. Индивидуальные вентиляторы имеют небольшие габариты и массу, в случае выхода из строя могут быть очень быстро заменены, поэтому устанавливать резервные вентиляторы на печь не требуется.

Печи со съёмными индукционными единицами оборудуют индивидуальными вентиляторами для охлаждения каждой единицы.

#### **МЕХАНИЗМ НАКЛОНА**

Канальные печи малой емкости (до 150–200 кг) снабжают обычно механизмом наклона с ручным приводом. Их ось наклона проходит вблизи центра тяжести.

Крупные печи оборудуют механизмами наклона с гидравлическим приводом, а их ось наклона располагают у сливного носка.

Наклон барабанных печей осуществляют путем поворота рабочего пространства вокруг оси, параллельной продольной оси ванны. При вертикальном расположении печи леточное отверстие находится выше уровня жидкого металла и при повороте агрегата на катках оно оказывается под зеркалом ванны. Положение летки относительно ковша в процессе слива металла не изменяется, поскольку летка располагается в центре опорного диска на оси поворота.

Механизм наклона любого типа должен обеспечивать возможность слива всего металла из печи.

### **1.4. Футеровка индукционных канальных печей**

Футеровка канальной печи является одним из наиболее ответственных ее элементов, от надежности конструкции которой зависит большинство технико-экономических показателей всей установки [8], [9]. К футеровке ванны печи и индукционных единиц (подовому камню) предъявляют разные требования. Футеровка ванны должна иметь высокую стойкость и длительный срок службы, т. к. стоимость футеровочных материалов высока, а время, необходимое для ее замены и сушки, может составлять несколько недель. Кроме того, футеровка ванны печи должна обладать хорошими теплоизолирующими свойствами для повышения тепловой КПД агрегата.

Материалы, применяемые для футеровки ванны, должны обладать постоянством объема при обжиге и иметь минимальный тем-



температурный коэффициент расширения (т.к.р.) при нагреве, чтобы исключить возможность возникновения опасных термических и механических напряжений в конструкции печи.

Огнеупорный слой футеровки ванны должен противостоять высоким термическим, химическим и механическим нагрузкам в процессе плавки. Огнеупорные материалы, применяемые для этой цели, должны обладать высокой плотностью, огнеупорностью, шлакоустойчивостью, термической стойкостью и иметь повышенную механическую прочность.

При качественном выполнении футеровочных работ соответствующими огнеупорами стабильность конструкции ванны печи для горячей выдержки чугуна сохраняется в течение двух лет, а для плавки медных сплавов – трех лет.

Футеровку канальной части печи (подовый камень) эксплуатируют еще в более тяжелых условиях, чем футеровка ванны, т. к. она работает под большим гидростатическим давлением столба жидкого металла. Температура расплава в канале выше, чем в ванне печи. Движение металла в канальной части агрегата, вызываемое магнитным потоком, приводит к быстрому механическому износу огнеупорного материала в печах для чугуна и медных сплавов. В каналах печей для плавки алюминия магнитные поля приводят к наслоению оксидов алюминия, обладающих меньшей подвижностью в определенной зоне, и способствуют зарастанию каналов.

Толщина футеровки канальной печи (подового камня) должна быть минимально возможной с тем, чтобы не ухудшать энергетических показателей печи. Уменьшенная толщина стенок канала иногда приводит к чрезмерному ослаблению механической прочности футеровки и возникновению значительных перепадов значений температуры по ее толщине между наружной и внутренней стенками канала, что вызывает образование в них трещин. Температура внутренних стенок канала соответствует температуре перегретого металла, а наружные стенки охлаждают потоком воды или струей холодного воздуха.

Одной из основных причин выхода из строя футеровки является проникновение расплавленного металла из канала подового камня до индуктора и кожуха по трещинам в футеровке. Дополнительным фактором образования трещин является пропитка стенок канала оксидами металла и шлака, меняющих в процессе охлаждения свои линейные размеры, что вызывает дополнительные меха-

нические напряжения в футеровке канала. При изготовлении футеровки подового камня применяют лучшие огнеупорные материалы и самые современные технологии.

Используемые для футеровки электрических плавильных печей огнеупорные материалы по своему химическому составу делятся на кислые, основные и нейтральные.

К кислым огнеупорным материалам относятся кремнеземистые набивные массы с высоким содержанием окиси кремния (97–99 %  $\text{SiO}_2$ ), динас, а также шамот, содержащий не связанную с глиноземом окись кремния ( $\text{Al}_2\text{O}_3 < 27\%$ ).

К основным материалам относятся огнеупоры, которые состоят главным образом из окислов магния или кальция (магнезитовые, магнезитохромитовые, периклазошпинелидные, периклазовые и доломитовые огнеупоры).

К нейтральным огнеупорным материалам относятся такие огнеупоры, для которых характерно преимущественное содержание амфотерных оксидов алюминия, циркония, а также оксидов хрома (корундовые, муллитовые, хромитовые, цирконовые и бакоровые огнеупоры).

В футеровках индукционных канальных печей огнеупорные материалы должны обладать огнеупорностью, превышающей значений температуры расплавленного металла, т. к. при температурах, приближающихся к температуре огнеупорности, эти материалы размягчаются и теряют строительную прочность. Качество огнеупорных материалов оценивают также по их способности противостоять нагрузке при высоких значениях температуры.

Огнеупорная футеровка чаще всего разрушается в результате химического взаимодействия со шлаками и металлом, расплавляемыми в печи. Степень разрушения ее зависит от химического состава металла, воздействующего на футеровку, его значения температуры, а также химического состава применяемых огнеупоров и их пористости.

При воздействии высоких температур большая часть огнеупоров уменьшается в объеме из-за дополнительного спекания и уплотнения их компонентов. Некоторые огнеупорные материалы (кварцит, динас и т. п.) увеличиваются в объеме. Чрезмерное изменение их в объеме может вызвать растрескивание, вспучивание и даже разрушение футеровки. Поэтому огнеупорные материалы должны обладать постоянством объема при рабочих температурах.

Изменение значения температуры при разогреве и особенно при охлаждении печей вызывает растрескивание огнеупорных материалов из-за их недостаточной термостойкости, которая является одним из наиболее важных факторов, определяющих срок службы футеровки inductionных печей.

На практике редко встречается изолированное воздействие только одного из перечисленных разрушающих факторов.

Однако пока нет огнеупорных материалов, сочетающих в себе одновременно все рабочие свойства, необходимые для устойчивой службы футеровки в inductionных плавильных печах. Каждый вид огнеупорного материала характеризуется присущими лишь ему свойствами, на основании анализа которых определяется область его применения. Для правильного выбора и эффективного использования огнеупорных материалов в конкретных печах необходимо детально знать, с одной стороны, все его важнейшие свойства, а с другой стороны, условия службы футеровки.

Все огнеупорные изделия подразделяются еще по следующим признакам:

1) по степени огнеупорности – на огнеупорные (1580–1770 °C), высокоогнеупорные (1770–2000 °C) и высшей огнеупорности (выше 2000 °C);

2) форме, размерам – на нормальный кирпич «прямой» и «клиновой», фасонные изделия простые, сложные, особо сложные, крупноблочные и монолитные огнеупорные бетоны, которые одновременно являются безобжиговыми огнеупорами;

3) способу изготовления – на изделия, полученные пластичным формованием (прессованием), полусухим прессованием, трамбованием из порошкообразных непластичных сухих и полусухих масс, литьем из шликера и расплава, вибрированием из огнеупорных бетонов, выпиливанием из плавленных блоков и горных пород;

4) характеру термической обработки – на безобжиговые, обожженные и отлитые из расплава;

5) характеру их пористости (плотности) – особо плотные, спекшиеся с пористостью менее 3 %, высокоплотные с пористостью 3–10 %, плотные с пористостью 10–20 %, обычные с пористостью 20–30 %, легковесные, теплоизоляционные с пористостью 45–85 %.

## **1.5. Назначение индукционных канальных печей**

Индукционные канальные печи в основном используют для плавки цветных металлов (медь и сплавы на медной основе – латунь, бронза, нейзильберы, мельхиоры, куниали; цинк; алюминий и их сплавы) и чугуна, а также в качестве миксеров для тех же металлов. Использование индукционных канальных печей для плавки стали ограничивают из-за низкой стойкости футеровки.

Наличие в индукционных канальных печах электродинамического и теплового движения расплавленного металла или сплава обеспечивает однородность химического состава и равномерность температуры расплавленного металла или сплава в ванне печи.

Индукционные канальные печи рекомендуется использовать в тех случаях, когда к выплавляемому металлу и полученным из него отливкам предъявляют высокие требования по минимальной газонасыщенности и неметаллическим включениям.

Индукционные канальные миксеры предназначены для перегрева жидкого металла, выравнивания его состава, создания постоянных температурных условий для его выпуска, а также дозирования и регулирования скорости разлива металла в кристаллизаторы литейных машин или в литейные формы.

Шихта для индукционных канальных печей должна готовиться в соответствии с заданным составом выплавляемой марки металла или сплава. Она отличается низкой исходной влажностью, состоит в основном из первичного чистого металла с минимальными включениями неорганических составляющих.

Применение канальных печей не рекомендуется при использовании загрязненной вторичной шихты, использовании стружки, особенно при выплавке алюминиевых сплавов, а также при выплавке всевозможных лигатур и сплавов на медной основе, содержащих свинец и олово, т. к. при этом резко снижается срок службы футеровки, повышая общие эксплуатационные и энергетические затраты.

По назначению индукционные канальные печи и миксеры делятся на печи:

– ИЛК – шахтного и барабанного типов, предназначенные для плавки меди и сплавов на медной основе. Миксер ИЛКМ предназначен для выдержки, перегрева и разлива меди и сплавов на медной основе;

– ИАК, предназначенные для плавки алюминия и его сплавов. Миксер ИАКР предназначен для перегрева, поддержания стабильной температуры жидкого алюминия и заливки его непосредственно в литейные формы;

– ИЦК, предназначенные для плавки катодного цинка. Миксер ИЦКМ – шахтного и барабанного типов – предназначен для выдержки, перегрева, разливки жидкого чугуна, может работать в комплекте с вагранками, или индукционными тигельными печами, или дуговыми печами (дуплекс-процесс)\*. Миксер раздаточный ИЦКР предназначен для перегрева, поддержания стабильной температуры жидкого чугуна и заливки его непосредственно в литейные формы, работает в комплексе с литейными машинами и литейными конвейерами.

Канальные печи могут работать самостоятельно с периодической разливкой расплавленного металла или сплава либо в составе плавильно-раздаточных комплексов. Например [10], агрегат ИЛКА-6 состоит из печи ИЛК-6 (полезная емкость 6 т, потребляемая мощность 1264 кВт, напряжение 475 В), переливного желоба и миксера ИЛКМ-6 (полезная емкость 6 т, потребляемая мощность 500 кВт, напряжение 350 В). Этот агрегат предназначен для плавки и полунепрерывной разливки меди и ее сплавов в круглые и плоские слитки.

Агрегат ИЛКА-16М2 состоит из двух печей ИЛК-16М2 (полезная емкость 16 т, потребляемая мощность 1656 кВт, напряжение 475 В), системы переливных обогреваемых желобов и миксера ИЛКМ-16М2 (полезная емкость 16 т, потребляемая мощность 500 кВт, напряжение 350 В), предназначен для непрерывной плавки и разливки высококачественной бескислородной меди на катанку.

К основным достоинствам индукционных канальных печей следует отнести:

---

\* Применение дуплекс-процессов для плавки в двух различных плавильных агрегатах целесообразно при полном использовании преимуществ каждой печи, таких как энергетические, теплотехнические, эксплуатационные, экономические и др. [11]. Например, при плавке в вагранке КПД при расплавлении достигает 60 %, а при перегреве всего 5 %. В индукционной печи при плавке КПД низкий, не более 30 %, а при перегреве высокий – около 60 %, следовательно, соединение вагранки с индукционной печью дает явное преимущество в использовании тепловой энергии. Кроме того, в индукционных печах можно получить металл с более точным химическим составом при более стабильной температуре перегрева, чем в вагранках и дуговых электропечах.

1) минимальный угар (окисление) и ограниченное испарение металла, т. к. нагрев происходит снизу. К наиболее нагретой части расплава, находящейся в каналах, нет доступа воздуха, а поверхность металла в ванне имеет сравнительно низкое значение температуры;

2) низкий расход энергии на расплавление, перегрев и выдержку металла. Канальная печь имеет высокий электрический КПД благодаря использованию замкнутого магнитопровода. В то же время высок и тепловой КПД печи, т. к. основная масса расплава находится в ванне, имеющей толстую теплоизолирующую футеровку;

3) высокую однородность химического состава металла в ванне благодаря циркуляции расплава, обусловленной электродинамическими и тепловыми усилиями. Циркуляция способствует также ускорению процесса плавки.

К *основным недостаткам* индукционных канальных печей относятся:

1) тяжелые условия работы футеровки канала – подового камня. Стойкость этой футеровки снижается при повышении температуры расплава, при плавке сплавов, содержащих химически активные компоненты (например, бронзы, имеющие в своем составе олово и свинец). Затруднена плавка в этих печах также низкосортной, загрязненной шихты вследствие зарастания каналов;

2) необходимость постоянного присутствия (даже при длительных перерывах в работе) в печи сравнительно большого количества (не менее 10–15 %) расплавленного металла (болото). Полный слив металла ведет к резкому охлаждению футеровки каналов и к ее растрескиванию. По этой причине невозможен также быстрый переход с одной марки выплавляемого сплава на другую. В этом случае приходится проводить ряд балластных переходных плавов. Постепенной загрузкой новой шихты меняют состав сплава от исходного до требуемого;

3) шлак на поверхности ванны, имеющий низкое значение температуры. Это затрудняет проведение нужных металлургических операций между металлом и шлаком. По этой же причине, а также ввиду малой циркуляции расплава вблизи поверхности затруднено расплавление стружки и легкого скрапа.

## **1.6. Конструктивные особенности канальных печей для плавки различных металлов**

### **ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ**

Температура расплавления меди составляет  $1230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и, чтобы перегрев металла не привел к существенному сокращению срока службы подового камня, удельная мощность в каналах не должна превышать  $50 \cdot 10^6\text{ Вт/м}^3$ .

Для латуни температура разливки не превышает  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а удельная мощность в каналах составляет  $(50\ldots 60) \cdot 10^6\text{ Вт/м}^3$ . При большей удельной мощности возникает так называемая цинковая пульсация, состоящая в прерывании тока в каналах. Цинк, чья температура плавления меньше температуры плавления латуни, при ее плавке вскипает в каналах. Его пары в виде пузырьков поднимаются к устью каналов, где, соприкасаясь с более холодным металлом, конденсируются. Наличие пузырьков приводит к сужению сечения канала, а следовательно, к возрастанию плотности тока в нем и увеличению сил электродинамического обжатия металла в канале магнитным полем собственного тока. При удельной мощности, выше указанной, происходит интенсивное кипение цинка, рабочее сечение существенно сокращается, электродинамическое давление превосходит гидростатическое давление столба металла над каналом, вследствие чего металл оказывается пережатым с возрастанием его электрического сопротивления и уменьшением значения протекающего тока. После разрыва электрической цепи электродинамические силы исчезают, пузырьки всплывают, вслед за чем прохождение тока возобновляется. Разрывы тока в канале происходят 2–3 раза в секунду, нарушая нормальную работу печи.

При удельной мощности, ниже указанной, цинковая пульсация начинается при прогреве всей ванны до значения температуры порядка  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  и служит сигналом о готовности латуни к разливке.

Для плавки меди и ее сплавов применяются шахтные, а при загрузке более 3 т – барабанные печи и миксеры. Коэффициент мощности при плавке меди составляет примерно 0,5; при плавке бронз и латуней – 0,7; при плавке медно-никелевых сплавов – 0,8.

### **ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ**

Особенности канальных печей для плавки алюминия и его сплавов (рис. 1.11, 1.12) [12] связаны с легкой окисляемостью алюминия и другими свойствами металла и его оксида. Алюминий

имеет температуру плавления  $658^{\circ}\text{C}$ , температурный уровень разлива составляет около  $730^{\circ}\text{C}$ . Низкая плотность жидкого алюминия делает нежелательной интенсивную циркуляцию расплава, т. к. неметаллические включения, увлеченные на глубину ванны, всплывают очень медленно.

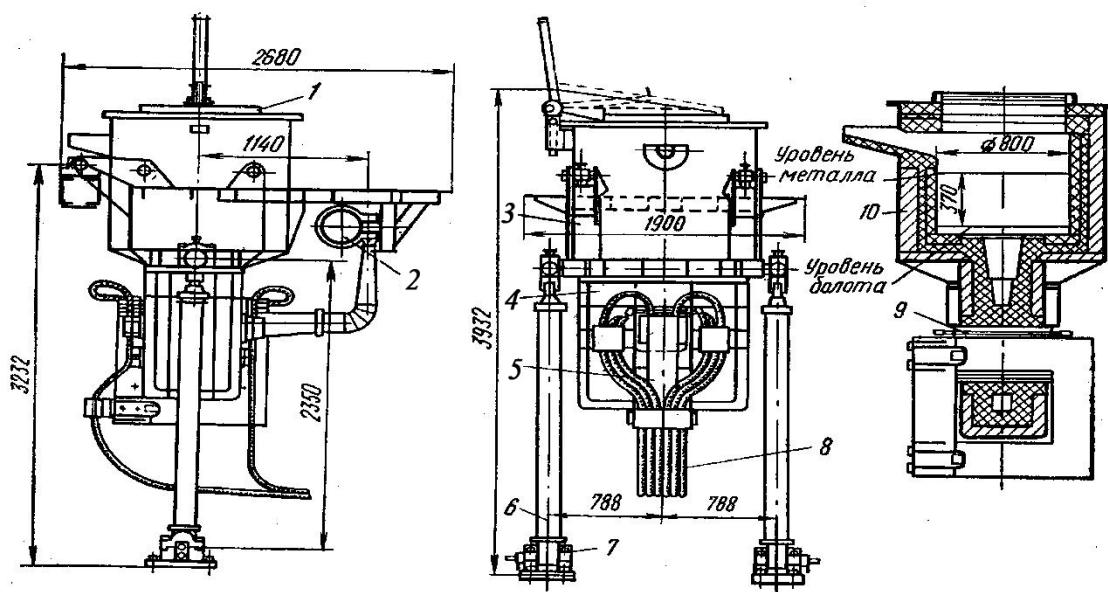


Рис. 1.11. Общий вид индукционной канальной электропечи ИА-0,5 для плавки алюминия и алюминиевых сплавов (полезная емкость печи 500 кг, остаточная емкость 250 кг, мощность печи 125 кВт):

1 – крышка с механизмом подъема; 2 – подача вентиляторного воздуха; 3 – верхний кожух; 4 – нижний кожух; 5 – магнитопровод; 6 – плунжер; 7 – подшипники; 8 – водопровод; 9 – индуктор; 10 – футеровка

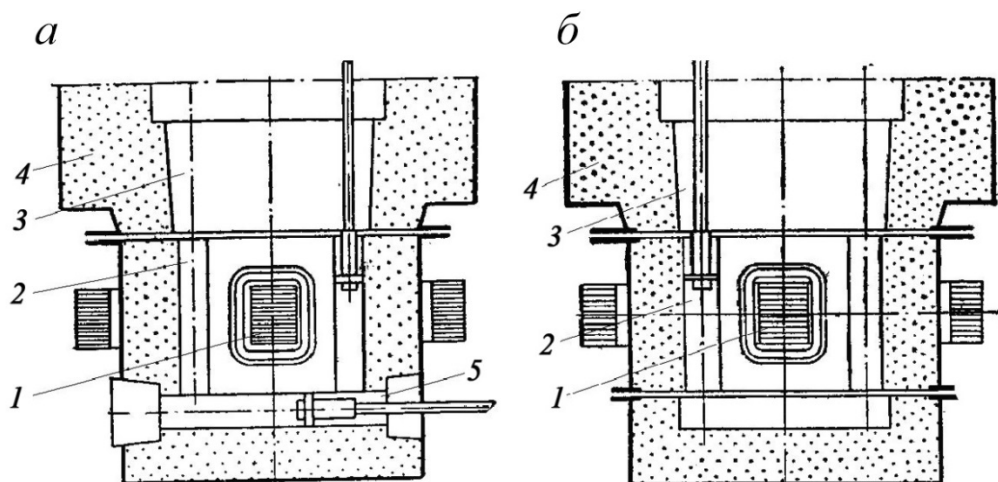


Рис. 1.12. Сменные индукционные единицы для плавки алюминия с прямоугольными каналами:

*а* – с доступом к вертикальным и горизонтальным каналам;  
*б* – без доступа к вертикальным каналам:  
 1 – индуктор; 2 – вертикальный канал;  
 3 – ванна; 4 – футеровка; 5 – индикатор состояния футеровки



Расплавленный алюминий в печи покрывается пленкой твердого оксида, которая, благодаря поверхностному натяжению алюминия, удерживается на его поверхности, предохраняя металл от дальнейшего окисления. Однако если сплошная пленка взломана, то осколки ее тонут и опускаются на дно ванны, попадая в каналы жидкого металла. Оксид алюминия химически малоактивен и осколки пленки, вследствие химического взаимодействия с включениями и газовой средой, прикрепляются к стенкам каналов, уменьшая их сечение. В процессе работы каналы «зарастают» и их приходится периодически очищать.

Эти свойства алюминия и его оксида вынуждают эксплуатировать печи с низкой удельной мощностью в каналах. При этом перегрев металла в каналах уменьшают, а значение температуры на поверхности ванны поддерживают на минимальном уровне, что снижает его окисление, скорость которого растет с повышением температуры.

При малой удельной мощности замедляется циркуляция металла, что способствует сохранению целостности окисленной пленки и уменьшению количества неметаллических включений. Обеспечить сохранность окисной пленки полностью невозможно, т. к. она разрушается при загрузке шихты. В период расплавления взламывание пленки происходит главным образом вследствие циркуляции металла. Поэтому в печах для плавки алюминия принимают меры для ее ослабления, особенно в верхней части ванны, уменьшают удельную мощность в каналах; часто применяют горизонтальное расположение каналов, а при вертикальном их расположении увеличивают глубину ванны; переход из канала в ванну выполняют под прямым углом, что увеличивает гидравлическое сопротивление устья канала. Горизонтальное расположение каналов затрудняет попадание осколков пленки в каналы, но не исключает его полностью, т. к. они могут увлекаться в каналы циркуляцией металла.

Каналы печей для плавки алюминия состоят из прямолинейных участков, что позволяет облегчить их очистку. Заращение канала оказывает влияние на электрический режим тогда, когда его размер становится приблизительно равным глубине проникновения тока в металл, которая для расплавленного алюминия при частоте 50 Гц равна 3,5 см. Поэтому, чтобы очистку каналов проводить реже, ограничивают минимальный поперечный размер канала 6–10 см. Для

горизонтального участка, очищать который особенно затруднительно, поперечный размер канала этого участка поддерживают примерно 1,3–1,5 от его первоначального размера. Вертикальные участки очищают примерно один раз в смену, горизонтальные – один раз в сутки.

Наряду с применением печей других конструктивных типов используют двухкамерные печи. Их могут выполнять однофазными с двумя каналами, соединяющими ванны, или трехфазными с четырьмя каналами. В стенках ванн по осям каналов делают отверстия для чистки каналов, закрываемые глиняными пробками. Чистку каналов производят после слива металла.

Коэффициент мощности таких печей из-за большого сечения каналов низок и составляет 0,3–0,4.

### ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ ЦИНКА

В канальных печах переплавляют катодный цинк высокой чистоты, не требующий рафинирования. Расплавленный цинк, обладая высокой жидкотекучестью, вступает в соединение с футеровочными материалами. В связи с тем что процесс пропитывания футеровки цинком ускоряется с увеличением гидростатического давления металла, печи для плавки цинка выполняют с прямоугольной ванной небольшой глубины, а индукционные единицы – с горизонтальными каналами (рис. 1.13) [12].

Ванну печи разделяют на плавильную и разливочную камеры внутренней перегородкой, в нижней части которой имеется окно для перетекания чистого металла в разливочную камеру. При этом примеси и загрязнения, находящиеся у поверхности, остаются в плавильной камере. Печи оборудуют загрузочными и разливочными устройствами, они работают в непрерывном режиме: катодный цинк загружают в плавильную камеру через проем в своде, а переплавленный металл разливают в изложницы. Разливку осуществляют вычерпыванием металла ковшом, выпуском его через клапан или выкачиванием насосом. Загрузочное и разгрузочное устройства имеют конструкцию, исключающую попадание паров цинка в цех, их снабжают мощной вытяжной вентиляцией.

Печи с применением съемных индукционных единиц выполняют качающимися, а с несъемными – стационарными. Их наклон используют для замены индукционной единицы без слива металла.

Коэффициент мощности печей для плавки цинка составляет 0,5–0,6.



Печи мощностью до 16 т выполняются в виде шахтной конструкции с одной или двумя съемными единицами. Печи большей емкости выполняют с числом съемных единиц 1–4.

Существуют специальные канальные раздаточные миксеры для обслуживания литейных конвейеров. Выдачу дозированной порции из такого миксера производят с помощью либо наклона печи, либо вытеснения металла путем подачи сжатого газа в герметизированное рабочее пространство печи.

Канальные миксеры для чугуна имеют сифонные системы заливки и слива металла; заливной и выпускной каналы выходят в ванну около ее дна, ниже зеркала расплава. Благодаря этому металл не загрязняется шлаком. Заливка и слив металла могут происходить одновременно.

### **1.7. Особенности эксплуатации индукционных канальных печей**

Шихту канальных печей составляют из чистых исходных материалов, отходов производства и лигатур (промежуточные сплавы). В печь загружают сначала тугоплавкие компоненты шихты, затем составляющие основную массу сплава и последними – легкоплавкие. В процессе расплавления шихту следует периодически осаживать во избежание сваривания кусков и образования мостов над расплавленным металлом.

При плавке алюминия и его сплавов шихтовые материалы должны быть очищены от неметаллических загрязнений, поскольку из-за малой плотности алюминия их удаляют из расплава с большим трудом. Так как скрытая теплота плавления алюминия велика, то при загрузке в печь большого количества шихты металл может затвердеть в каналах, поэтому шихту загружают небольшими партиями. Напряжение на индукторе в начале плавки должно быть снижено. По мере накопления массы жидкого металла напряжение повышают, следя за тем, чтобы ванна оставалась спокойной, а оксидная пленка на ее поверхности не взламывалась.

При временных остановках канальную печь переводят в режим холостого хода, когда в ней оставляют лишь такое количество металла, которое обеспечивает заполнение каналов и сохранение в каждом из них замкнутого кольца жидкого металла. Этот остаток расплава

поддерживают в жидкоподвижном состоянии. Мощность в таком режиме составляет 10–15 % номинальной мощности печи.

При длительных остановках печи весь металл из нее должен быть слит, т. к. при застывании и последующем охлаждении происходит разрыв его в каналах вследствие сжатия, после чего пуск печи становится невозможным. Для пуска опорожненной печи в нее предварительно заливают расплавленный металл для обеспечения замкнутости его электрической цепи. При этом ванна и подовый камень агрегата должны быть предварительно разогреты до температуры, близкой к температуре расплава, во избежание растрескивания футеровки и застывания металла в каналах. Разогрев футеровки для предотвращения ее разрушения при формировании внутренних термических напряжений в ее конструкции является длительным процессом, поскольку скорость его не должна превышать несколько градусов в час.

Переход к новому составу сплава возможен лишь при условии, что футеровка по своим температурным характеристикам, показателям рабочих свойств пригодна для выплавки нового сплава. Прежний сплав полностью сливается из печи, и в нее заливают новый. Если прежний сплав не содержал компонентов, не допустимых для нового сплава, то годный металл может быть получен при первой же плавке. Если же такие компоненты присутствовали, то приходится провести несколько переходных плавов, после каждой из которых содержание нежелательных компонентов, оставшихся в каналах и на стенках ванны при сливе металла, снижается.

Для нормальной эксплуатации канальной печи со съемными индукционными единицами необходимо иметь в резерве полный комплект этих элементов, готовых к немедленной замене. Замену индукционных единиц производят на горячей печи с временным отключением охлаждения заменяемого устройства. Поэтому все операции по замене выполняют быстро, чтобы длительность перерыва в подаче охлаждающей воды и воздуха не превысила 10–15 мин. В противном случае электрическая изоляция будет разрушена.

Состояние футеровки ванны в процессе эксплуатации визуально контролируют с применением переносной аппаратуры. Контроль недоступных для осмотра каналов осуществляют косвенным методом, путем регистрации активного и реактивного сопротивлений каждого индуктора, которые определяют по показаниям киловатметра и фазометра. Активное сопротивление в первом прибли-

жении обратно пропорционально площади сечения канала, а реактивное – пропорционально расстоянию от канала до индуктора. Поэтому при равномерном расширении (размыве) канала активное и реактивное сопротивления снижаются, а при равномерном зарастании канала – увеличиваются; при сдвиге канала в сторону индуктора реактивное сопротивление уменьшается, а при сдвиге в сторону кожуха – увеличивается. По результатам измерений строят диаграммы и графики изменения сопротивлений, позволяющие судить об износе футеровки каналов. О состоянии футеровки канальной печи свидетельствует также температура кожуха, которую регулярно измеряют во многих контрольных точках. Местный перегрев кожуха или непрерывное повышение температуры воды в какой-либо ветви системы охлаждения свидетельствует о начавшемся разрушении футеровки.

Футеровка индукционных канальных электропечей выполняет одновременно функции электрической и тепловой изоляции всей конструкции агрегата. Однако при отсыревании (холодная печь) или насыщении ее электропроводящими материалами (из расплава или газовой среды) электрическое сопротивление футеровки резко падает, что для обслуживающего персонала создает опасность поражения током.

Вследствие неисправности электроизоляции может возникнуть электрический контакт между токоведущими частями и другими металлическими частями электропечи. В результате такие сборочные единицы, как каркас печи, его ограждения, с которыми в процессе эксплуатации соприкасается персонал, могут оказаться под напряжением.

При эксплуатации индукционных канальных печей и устройств, входящих в состав их электротехнического оборудования, (щиты управления, трансформаторы и т. п.) для защиты от поражения током применяют обычные средства: заземление металлических частей (каркасов печей, площадок и пр.), индивидуальные изоляционные средства (рукавицы, ручки, подставки; помосты и др.), блокировки, предотвращающие открывание дверей до отключения установки, и др.

Источником взрывоопасности в канальной электропечной установке являются водоохлаждаемые узлы (кристаллизаторы, индукторы, кожухи и другие элементы электропечей). При неисправностях герметичность их нарушается и вода попадает

в рабочее пространство агрегата. Под действием высокой температуры вода интенсивно испаряется и в герметично закрытой печи в результате повышения давления может произойти нарушение ее целостности. При повышенных значениях температуры (более 1100 °С) вода разлагается с образованием водорода и кислорода, что является одной из причин формирования взрывоопасной смеси и ее воспламенения. Такие аварии обычно сопровождаются разрушением футеровки в индукционных плавильных печах.

К взрыву может привести также скопление в рабочем пространстве печи легко воспламеняющихся металлических включений (натрий, магний и др.), образующихся в ходе технологического процесса. Источником взрыва могут быть и дефекты элементов электротехнической установки.

В процессе эксплуатации канальной печи необходимо постоянно вести наблюдение за бесперебойной подачей охлаждающей воды и воздуха и их температурой на выходе из систем охлаждения. При снижении уровня давления подаваемой воды или воздуха должно срабатывать соответствующие реле, отключающее энергопитание неисправной индукционной единицы с подачей световых и звуковых сигналов. В случае понижения давления в подающей водоподводной магистрали индукционную печь переводят на резервное охлаждение от пожарного водопровода или аварийного бака, обеспечивающего самотечное поступление воды в системы охлаждения печи на срок не менее 0,5–1 ч. Прекращение бесперебойной подачи охлаждающей воды и воздуха приводит к формированию условий аварийной ситуации, которая может сопровождаться расплавлением обмотки индуктора.

Прекращение подачи воды в водоохлаждаемые рубашки кристаллизаторов может привести к тому, что металл, переливаемый из раздаточной коробки в кристаллизатор, застывает в кристаллизаторе, что сопровождается выходом из строя кристаллизатора и нарушением всего технологического процесса получения отливок.

С прекращением питания электроэнергией металл в печи может застыть, что является серьезной аварией с разрушением конструкции печи или ее элементов. Поэтому в системах электроснабжения канальных печей обязательно предусматривают резервирование дополнительных источников электроэнергии. Мощность резервного пи-

тания должна быть достаточной для поддержания металла в печи в расплавленном состоянии.

Нарушение целостности футеровки печи (незафиксированное визуально или по приборам) приводит к тому, что металл из ванны или канальной части печи попадает на печной трансформатор, в результате чего он может выйти из строя и возникнуть взрывоопасная ситуация.

Взрывобезопасность технологии плавки металла в канальных печах обеспечивают путем надежного контроля за ходом процесса, сигнализацией о нарушениях теплового и электрического режимов, незамедлительным устранением неисправностей, инструктажем обслуживающего персонала.

### **1.8. Расположение оборудования литейной установки**

Электropечная установка (рис. 1.14) включает в себя собственно канальную печь с механизмом наклона и ряд элементов оборудования, необходимых для обеспечения ее нормальной работоспособности.

Канальные печи сравнительно небольшой мощности питают от шин низкого напряжения цеховой понижающей подстанции. При наличии нескольких печных агрегатов их распределяют по фазам так, чтобы по возможности равномерно загрузить трехфазную сеть. Автотрансформатор для регулирования напряжения иногда устанавливают один на несколько печей. В этом случае схема коммутации технологического оборудования должна позволять быстро его включать в цепь любой печи, например, при плавке латуни и цинка в литейных цехах с постоянным режимом работы, когда понижение напряжения может потребоваться при первом пуске какой-либо печи после замены индукционной единицы или при случайном простое для поддержания металла в печи в нагретом состоянии.

Печи мощностью свыше 1000 кВт обычно питают от сети 6 (10) кВ через индивидуальные силовые понижающие трансформаторы, оборудованные встроенными переключателями ступеней напряжения.

Компенсирующая конденсаторная батарея, как правило, входит в состав печной установки, однако у агрегата, имеющего небольшую мощность и относительно высокий коэффициент мощности (0,8 и выше), ее может и не быть. Каждая установка содержит отдельный токоподвод и аппаратуру защиты и сигнализации, изме-



1 – трансформаторная ячейка; 2 – токоподвод; 3 – щит управления; 4 – рабочая площадка; 5 – наклоняющаяся площадка; 6 – пульт управления наклоном; 7 – гидравлический механизм наклона печи; 8 – силовой щит; 9 – маслонапорная установка

Отметку, на которой устанавливают печь, выбирают из условия удобства загрузки или заливки и слива исходного металла, а также условий монтажа и смены индукционных единиц. Как правило, канальные печи малой емкости устанавливают на уровне пола цеха. Наклоняющиеся печи средней и большой емкости располагают на приподнятой рабочей площадке. Крупные барабанные печи, имеющие помосты для обслуживания, размещают, как правило, на уровне пола.

Конденсаторную батарею обычно размещают в непосредственной близости от плавильного агрегата, обычно под рабочей площадкой или в подвале помещения с принудительной вентиляцией, поскольку конденсаторы на частоте 50 Гц требуют принудительного воздушного охлаждения. При открывании двери конденсаторного помещения установку отключают при помощи блокировки безопасности. Под рабочей площадкой устанавливают также автотрансформатор и маслонапорную установку гидропривода механизма наклона.

При питании печи от отдельного силового трансформатора его ячейку располагают как можно ближе к месту ее размещения для уменьшения потерь в токоподводе. Вблизи электропечной установки должен быть оборудован участок для осуществления футеровочных работ, сушки и прокаливания индукционных единиц.

На рис. 1.14 показана плавильная установка с канальной печью емкостью 1,6 т для плавки медных сплавов. Трансформаторная ячейка 1, в которой размещают трансформатор мощностью 1000 кВ·А с коммутационной аппаратурой высокого напряжения и защитой, изображена штриховыми линиями, т. к. ее можно располагать и в другом месте. На рабочей площадке 4 установлен щит управления 3, на лицевой панели которого располагают измерительные приборы, сигнальные лампы, кнопки включения и отключения нагрева и управления переключением ступеней напряжения. Управление наклоном печи 5 производят с пульта 6, установленного в месте, удобном для наблюдения за сливом металла. Уровень рабочей площадки должен обеспечивать удобство подведения ковша под сливной носик печи. Площадка 4, наклоняющаяся вместе с печью, закрывает вырез в основной рабочей площадке и позволяет печи свободно поворачиваться вокруг оси наклона. Под рабочей

площадкой установлен силовой щит 8 с электроаппаратурой и гидравлический механизм наклона печи 7; здесь же монтируют токоподвод 2, соединенный с печью гибкими кабелями. Под рабочей площадкой располагают также конденсаторную батарею и маслонапорную установку.

## **2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ**

Существует два основных метода расчета индукционных канальных печей. Один из них основан на теории поглощения электромагнитных волн в металле. Этот метод предложен А. М. Вайн-бергом и изложен в монографии «Индукционные канальные печи» [2]. Второй метод основан на теории трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания. Одними из авторов этого метода являются С. А. Фардман и И. Ф. Колобнев [13]. Этот метод нашел широкое применение как инженерный метод расчета индукционных канальных печей [5]–[7].

В качестве исходных данных для расчета принимают [13] характеристики расплавляемого металла или сплава, к которым относятся:

- температура плавления и разливки;
- плотность в твердом и расплавленном состоянии;
- теплосодержание, или энтальпия сплава при температуре разливки (зависимость энтальпии от температуры показана на рис. 2.1), или теплоемкость и скрытая теплота плавления;
- удельное сопротивление в твердом и расплавленном состоянии (зависимость удельного сопротивления от температуры показана на рис. 2.2).

Основными характеристиками печи являются:

- назначение печи, ее емкость и производительность;
- длительность плавки и длительность загрузки и разливки.

Характеристиками питающей сети принимают:

- частоту питающей сети;
- напряжение сети или напряжение вторичной обмотки электропечного трансформатора, питающего печь.

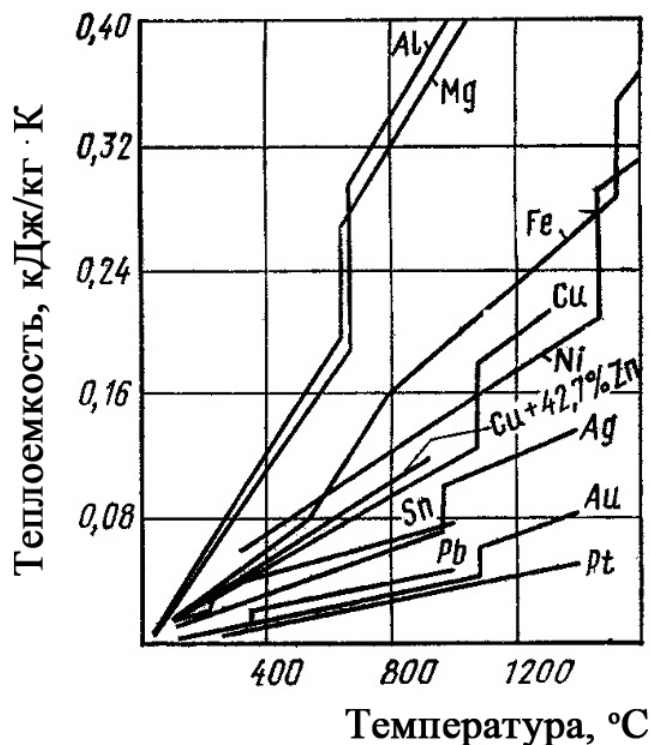


Рис. 2.1. Энтальпия различных металлов

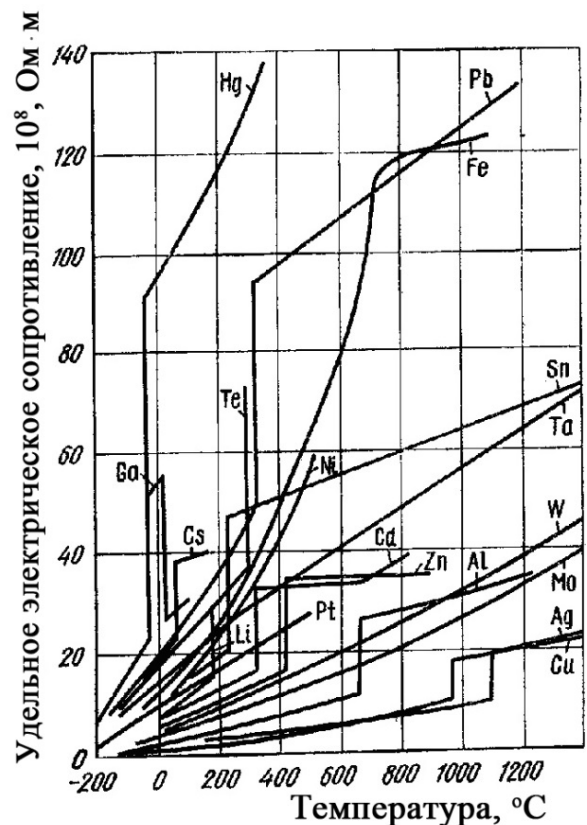


Рис. 2.2. Зависимость удельного электрического сопротивления некоторых металлов от температуры

## 2.1. Определение емкости печи

Полная емкость печи  $G$ , кг, состоит из полезной (сливаемой) емкости  $G_n$  и остаточной емкости (емкость болота)  $G_6$  [13]:

$$G = G_n + G_6. \quad (2.1)$$

Принцип действия канальной печи требует наличия постоянно замкнутой вторичной цепи. Поэтому все канальные печи работают с остаточной емкостью, составляющей обычно 20–50 % полной емкости печи и обеспечивающей постоянное заполнение канала жидким металлом.

Остаточная емкость (емкость болота), кг, может быть определена по выражению

$$G_6 = k_6 G, \quad (2.2)$$

где  $k_6$  – коэффициент, учитывающий остаточную емкость (масса болота). Этот коэффициент принимают равным 0,2–0,5, причем меньшие значения принимают для печей емкостью более 1 т, а большие – для печей емкостью менее 1 т.

Полезная емкость (сливаемая емкость) печи, кг, составляет

$$G_n = \frac{10^3 A_n}{m_n} \quad (2.3)$$

где  $A_n$  – суточная производительность печи (т/сут);

$m_n$  – число плавов в сутки,

$$m_n = \frac{24}{\tau_1 + \tau_2} \quad (2.4)$$

Здесь  $\tau_1$  – длительность плавки и подогрева жидкого металла, ч;

$\tau_2$  – длительность разливки, загрузки, чистки и т. д., ч.

Следует отметить, что значение производительности печи весьма относительно. В справочной литературе значения производительности дают ориентировочно (табл. 2.1) [10]–[12].

Длительность плавки и перегрева жидкого металла ( $\tau_1$ ) зависит от физических свойств (теплоемкость и скрытая теплоты плавления) расплавляемого металла и сплавов. Повышение производительности связывают с уменьшением значения  $\tau_1$ , что ведет к повышению подводимой к печи мощности и влияет на конструкцию печи, т. е. вместо однофазной печи необходимо использовать трехфазную печь, вместо одной индукционной единицы необходимо использовать несколько индукционных единиц и т. д.

Увеличение значения  $\tau_1$  может нарушить технологический процесс плавки металла или сплава, например, легирующие добавки могут испариться до процесса разливки. В зависимости от вида загружаемой шихты, скорости отливки, размера сечения отливаемого слитка и т. д. значение  $\tau_2$  также изменяется в широком диапазоне. Поэтому при проведении расчетов необходимо величину производительности оценивать с учетом как технологии плавки металлов или сплавов, так и конструктивных особенностей разрабатываемой печи.

Если задана полезная емкость печи, то полную ее емкость, кг, определяют по выражению

$$G = G_n / (1 - k_6).$$

Таблица 2.1

## Технические характеристики индукционных канальных печей

Характеристики	Тип электропечей								
	ИЛК-0,75	ИЛК-1	ИЛК-1,6	ИЛК-2,5	ИЛК-6	ИАК-0,4	ИАК-6	ИЦК-25	ИЦК-40
Емкость, т									
– полная,	1,05	1,3	2,5	5,5	10,3	0,7	9,0	25	40
– полезная	0,75	1,0	1,6	2,5	6,0	0,4	6,0	25	40
Мощность, кВт	250	250	750	750	316x4	125	1000	540	700
Производительность (ориентировочно), т/сут	30	21	64	63	80	5	42	130	187
Число индукционных единиц	1	1	1	1	4	1	1	6	6
Число фаз	1	1	3	3	1	1	3	3	3
Коэффициент мощности без компенсации	0,70	0,66	0,66	0,66	0,32	0,4	0,3	0,65	0,63
Масса печи, общая с металлом, т	7,2	7,8	15,5	32	60	6,7	52	55	80

Объем ванны печи составляет,  $\text{м}^3$ ,

$$V_{\text{вп}} = \frac{G}{\gamma_{\text{мж}}}, \quad (2.6)$$

где  $\gamma_{\text{мж}}$  – плотность металла в жидком состоянии,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

В табл. 2.2 [13] приведены значения плотности некоторых металлов и сплавов.

Сечение ванны печи  $S_{\text{вп}}$  определяют после расчета канала печи. Высоту ванны печи  $h_{\text{вп}}$ , м, устанавливают по выражению

$$h_{\text{вп}} = \frac{V_{\text{вп}}}{S_{\text{вп}}}.$$

## 2.2. Выбор формы ванны печи

По форме ванны различают четыре основных класса канальных печей.

Плавильная камера печей *шахтного типа* выполнена в виде вертикального цилиндра (рис. 2.3, а). Ее преимущества заключается в простоте ремонта и замены футеровки ванны, удобстве механизированной загрузки печи.

Плавильная камера печей *барабанного типа* выполнена в виде горизонтального цилиндра. Индукционные единицы располагают по обе стороны барабана. Такую конструкцию используют в качестве электромиксера или копильника жидкого металла для подогрева и выравнивания его температуры перед разливкой, когда объем отливки больше емкости плавильной печи, допускающий одновременно заливку и разливку металла (рис. 2.3, б).

Ванну наклоняют в обе стороны вокруг горизонтальной оси с возможной заменой отдельных индукционных единиц без полного слива металла.

В печах *двухкамерного типа* горизонтальные или наклонные каналы состоят из двух ванн, одна из которых является плавильной, а другая – разливочной. Каналы вместе с примыкающими участками ванн образуют замкнутый вторичный виток (рис. 2.3, в).

Таблица 2.2

Характеристики некоторых металлов и сплавов, расплавляемых в индукционных канальных печах

Металл или сплав	Температура, °С		Плотность, т/м <sup>3</sup>		Удельная теплоемкость в жидком состоянии, кДж/(кг·град)			Скрытая теплота плавления, кДж/кг
	плавления	перегрева перед разливкой	при 20 °С	в жидком состоянии	при температуре плавления	при температуре перегрева	при температуре, °С	
Медь марки М0	1083	1225	8,89	8,30	0,5443	0,5589	0,435 + 0,0001 <i>t</i>	177,94
Латунь марки Л90	1045	1225	8,80	8,20	0,4769	0,4915	0,391 + 0,000 816 <i>t</i>	171,66
Латунь марки Л80	1000	1160	8,70	8,10	0,4769	0,4903	0,391 + 0,000 858 <i>t</i>	163,29
Латунь марки Л63	905	1070	8,50	7,80	0,4706	0,4865	0,389 + 0,000 904 <i>t</i>	148,63
Латунь марки Л70	940	1140	8,60	8,00	0,4739	0,4919	0,389 + 0,000 909 <i>t</i>	144,39
Бронза марганцовистая марки БрМц5	920	1070	8,50	7,80	0,4731	0,4873	0,387 + 0,000 938 <i>t</i>	143,35
Бронза фосфористая марки БрОФ2-0,25	1060	1225	8,60	8,00	0,4760	0,4890	0,391 + 0,000 795 <i>t</i>	16,75
Алюминий марки А0	658	700	2,4	2,4	1,2435	1,256	1,03 + 0,000 327 <i>t</i>	386,86



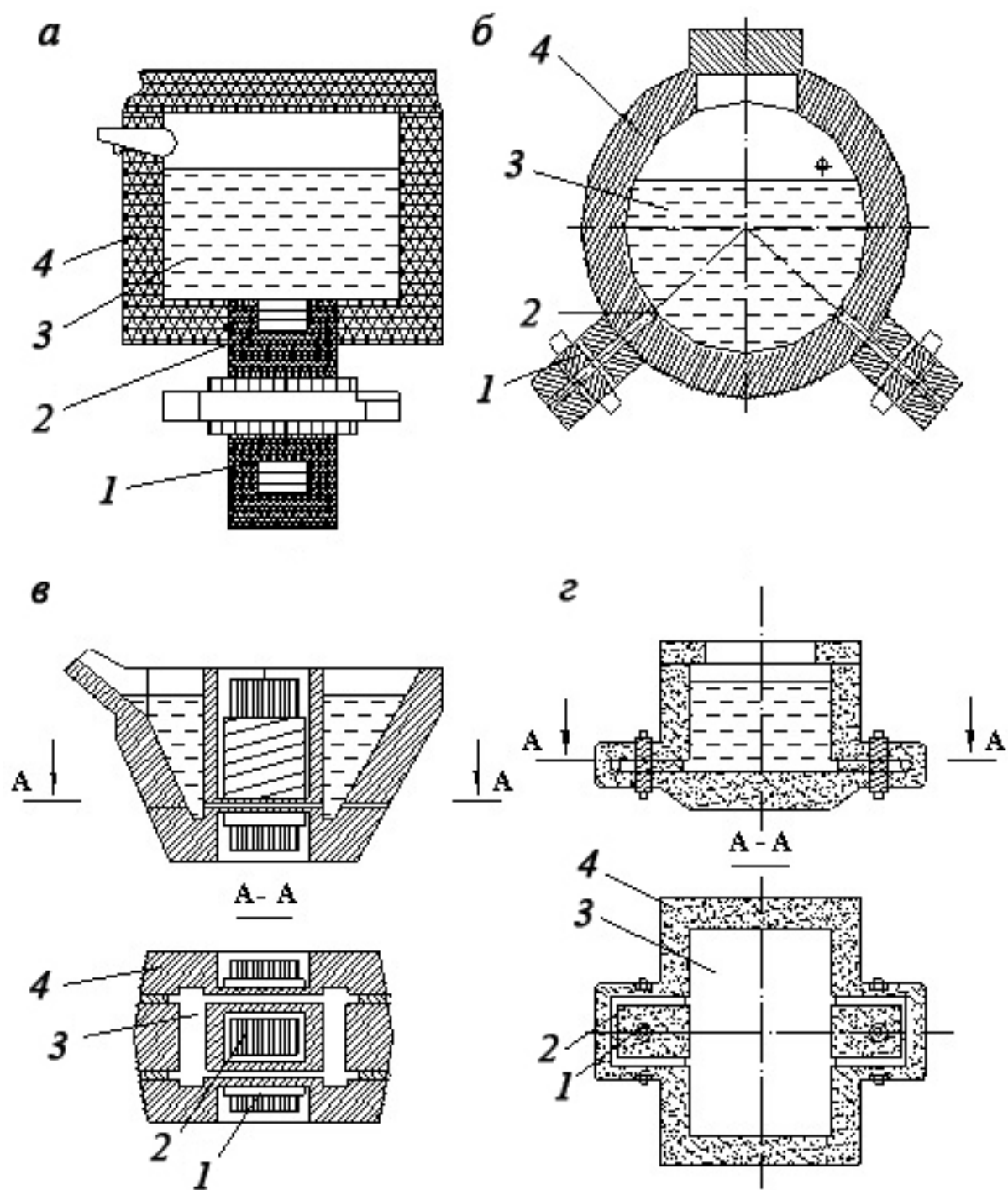


Рис. 2.3. Основные типы конструкций  
индукционных канальных печей:  
*а* – шахтная; *б* – барабанная; *в* – двухкамерная;  
*г* – с ванной прямоугольной формы:  
1 – индуктор; 2 – вертикальный канал; 3 – ванна; 4 – футеровка

Конструкция *печи с прямоугольной ванной* применяется редко: при стационарной ванне, когда печь не должна опрокидываться, а жидкий металл, такой как цинк, может быть легко вычерпан из печи или же выкачан, если форму ванны определяют в соответствии с технологическими соображениями (рис. 2.3, з).

Различают печи с вертикальными, горизонтальными и наклонными каналами. Печи с вертикальными каналами широко распространены. Перемешивание в них происходит интенсивно, производить чистку каналов несложно. Недостатком конструкции, особенно при достаточной глубине ванны, является большое гидростатическое давление в канале, ухудшающее условия работы подового камня.

Печи с горизонтальными каналами характеризуются малым гидростатическим давлением в канале, циркуляция металла в верхней части ванны ослаблена. Очистка каналов в таких печах затруднена.

Печи с наклонными каналами можно рассматривать как компромиссную конструкцию, сочетающую качества печей с вертикальными и горизонтальными каналами.

На рис. 2.4 [4] представлены конструктивные варианты исполнения каналов индукционных канальных печей.

Для плавки меди и ее сплавов при загрузке до 3 т применяют шахтные печи, а при загрузке более 3 т – барабанные печи и миксеры, их максимальная емкость достигает 35 т.

Для плавки цинка, как правило, используют печи с прямоугольной ванной небольшой глубины, индукционные единицы которых имеют горизонтальные каналы. Ванну разделяют на плавильную и разливочную камеры внутренней перегородкой.

Для плавки алюминия используют печи как с вертикальными каналами, так и с горизонтальными каналами. Емкость печей составляет 0,2–40 т.

Для плавки чугуна применяют шахтные печи емкостью до 16 т. Печи большей емкости бывают шахтные, но чаще барабанного типа. В основном находят применение индукционные канальные печи в качестве миксеров, емкость которых находится в пределах 0,5–250 т.

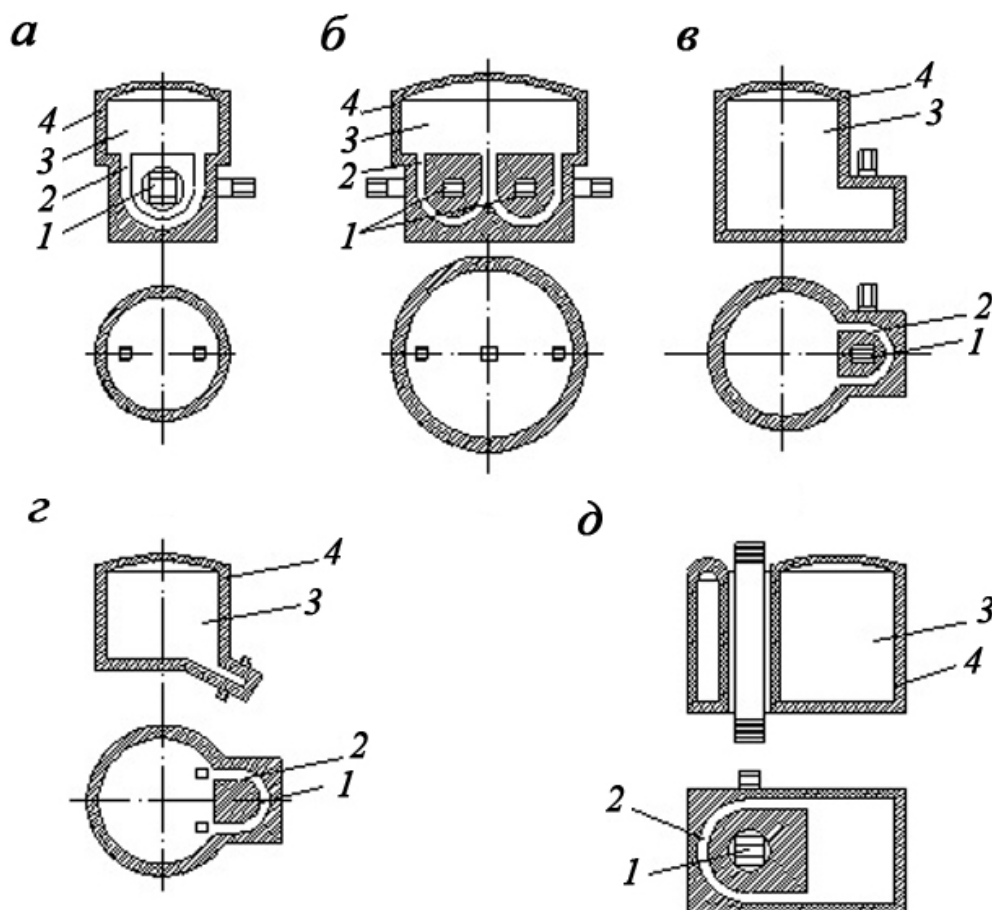


Рис. 2.4. Конструктивные варианты типов каналов индукционных каналных печей:  
*а* – один вертикальный канал; *б* – вертикальный сдвоенный канал;  
*в* – горизонтальный канал; *г* – наклонный канал; *д* – открытый канал:  
 1 – индуктор; 2 – вертикальный канал;  
 3 – ванна; 4 – футеровка

### 2.3. Определение мощности печи

На рис. 2.5 представлена в общем виде энергетическая диаграмма электротермической индукционной печи.

Для оценки полезной мощности плавильного агрегата необходимо знать количество тепловой энергии, достаточной для осуществления технологического процесса плавки металла или сплава.

Расчет количества тепловой энергии с использованием теплоемкости  $C$  и скрытой теплоты плавления  $\lambda$  представлен в виде трех составляющих на блок-схеме (рис. 2.6).



Рис. 2.5. Энергетическая диаграмма электротермической печи

Полезная активная мощность печи может быть определена через теплосодержание [6]

$$P_{\text{пол}} = \frac{Q}{3,6\tau_1} \Rightarrow P_{\text{пол}} = G_{\text{п}} (q_2 - q_1) / 3,6\tau_1, \quad (2.7)$$

где  $Q$  – количество тепловой энергии, необходимой для расплавления металла или сплава;

$G_{\text{п}}$  – полезная емкость печи, т;

$q_1$  и  $q_2$  – начальное и конечное удельное теплосодержание металла, Дж/кг\*;

$\tau_1$  – длительность плавки и подогрева жидкого металла, ч.

\* Теплосодержание – количество тепловой энергии, содержащейся в теле при определенной температуре [14]. Удельное теплосодержание – количество тепловой энергии, отнесенное к единице массы тела. Единица измерения в системе СИ – Дж/кг, для практических расчетов – Вт·ч/кг. По [15]  $1 \text{ Дж} = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ ;

$\frac{\text{Дж}}{\text{т}} = \frac{2,78 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} = \frac{1}{3,597} \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ .

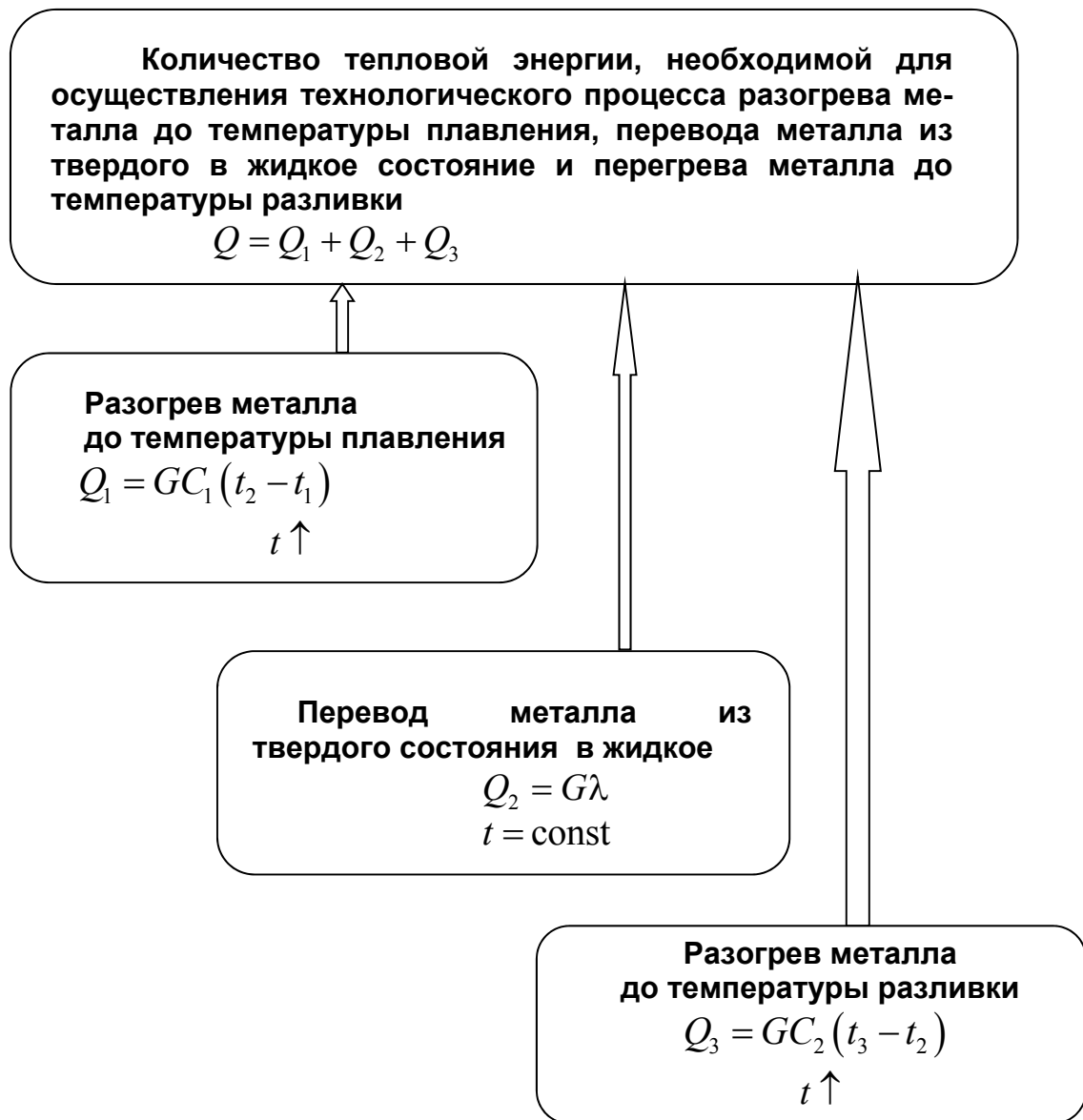


Рис. 2.6. Схема расчета количества тепловой энергии, подводимой к индукционной печи

Подводимая к печи активная мощность может быть определена по выражению

$$P_{\Pi} = P_{\text{пол}} + \Delta P_{\text{т.в}} + \Delta P_{\text{т.и}} + \Delta P_{\text{и}},$$

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_{\Pi}}, \quad (2.8)$$

где  $\Delta P_{\text{т.в}}$  – тепловые потери ванны печи;

$\Delta P_{\text{т.и}}$  – тепловые потери индукционных единиц;

$\Delta P_{\text{и}}$  – тепловые потери в меди индуктора,

$\eta_{\Pi}$  – общий коэффициент полезного действия (КПД) печи.

Общий КПД печи определяют по выражению

$$\eta_{\Pi} = \eta_{\text{э}} \eta_{\text{т}} = P_{\text{пол}} / P_{\Pi},$$

где  $\eta_e$  – электрический КПД печи;

$\eta_t$  – тепловой КПД печи.

На начальном этапе в предварительном расчете значение  $\eta_n$  обычно задают в пределах 0,6–0,9 в зависимости от емкости, мощности и назначения печи по известным из практики данным [13]. Более высокие значения КПД относят к печам большей емкости.

Ориентировочные значения КПД\* индукционных канальных печей:

Расплавляемый металл	Общий КПД печи
Медь .....	0,60–0,72
Латунь марки Л80 .....	0,75–0,85
Латунь марки Л63 .....	0,75–0,90
Бронза марки БрМц5 .....	0,70–0,80
Алюминий .....	0,60–0,85
Цинк .....	0,80–0,90
Чугун .....	0,80–0,86

Величину подводимой к печи активной мощности, Вт, также можно определить через энтальпию получаемого металла по выражению [5]

$$P_n = \frac{G_n c_p}{\tau_1 \eta_n}, \quad (2.9)$$

где  $G_n$  – полезная емкость печи, кг;

$c_p$  – теплоемкость металла или сплава при температуре разливки, кДж/кг·К.

Если величина теплосодержания (энтальпия) металла не известна, то подводимую к печи мощность, кВт, определяют в соответствии с блок-схемой по выражению [13]

$$P_n = \frac{Q_m}{864 \eta_n \tau_1}, \quad (2.10)$$

где  $Q_m$  – тепло, теоретически необходимое для расплавления и доведения до температуры разливки  $G$  кг сплава, кДж,

$$Q_m = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (2.11)$$

---

\* Значение КПД уточняется после расчета.

Здесь  $Q_1$  – тепло, необходимое для нагрева сплава массой  $G$  при теплоемкости  $C_1$  от начальной температуры  $t_n$  до температуры плавления  $t_n$ , кДж;

$Q_2$  – тепло, необходимое для перевода сплава массой  $G$  при  $t_n$  в расплавленное состояние при скрытой теплоте плавления  $\lambda$ , кДж;

$Q_3$  – тепло, необходимое для доведения сплава массой  $G$  при теплоемкости  $C_2$  от температуры плавления  $t_n$  до температуры разливки  $t_p$ , кДж.

$$Q_1 = G_n C_1 (t_n - t_n), \quad (2.12)$$

$$Q_2 = G_n \lambda, \quad (2.13)$$

$$Q_3 = G_n C_2 (t_p - t_n). \quad (2.14)$$

Значения теплоемкости и скрытой теплоты плавления для некоторых металлов и сплавов приведены в табл. 2.2.

Следует отметить, что значения подводимой к печи активной мощности, рассчитанные по выражениям (2.7)–(2.10), имеют расхождения.

Полную мощность печи,  $В \cdot А$ , устанавливают по выражению

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi}, \quad (2.15)$$

где  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности индукционной канальной печи.

При предварительном расчете коэффициент мощности\* печи обычно задают в зависимости от расплавляемого металла или сплава, для которого предназначена печь. В табл. 2.1 приведены ориентировочные значения, подтвержденные практикой эксплуатации, коэффициентов мощности индукционных канальных печей по [5], [13] без компенсации реактивной мощности, предназначенных для плавки некоторых металлов и сплавов.

Активная мощность одной индукционной единицы, Вт,

$$P = P_n / n, \quad (2.16)$$

где  $n$  – число индукционных единиц (индукционной единицей называется система, состоящая из печного трансформатора и подового камня с каналами).

Число индукционных единиц выбирают исходя из мощности печи с учетом условий их размещения при принятой конструкции ванны. Мощность однофазной единицы может достигать 50–

---

\* Значение коэффициента мощности уточняют после расчета. С ростом мощности индукционной единицы значение коэффициента мощности уменьшается.

1000 кВт, но во избежание несимметрии напряжений питающей сети уже при мощности печи 250–300 кВт рекомендуют переходить к двухфазным или трехфазным единицам либо применять несколько однофазных единиц.

Полную мощность одной индукционной единицы, В·А, определяют по выражению

$$S = P / \cos \varphi. \quad (2.17)$$

### ПРИМЕР 1

Определить ориентировочно полную мощность и количество индукционных единиц индукционной канальной печи для плавки латуни Л63, полученной полунепрерывным способом. Ее характеристики и химический состав [16] приведены ниже. Выбрать форму ванны печи. Выбрать типовой электропечной трансформатор соответствующей мощности. Полная емкость печи составляет 1,3 т.

#### Характеристики латуни Л63:

Температура плавления .....	$t_n = 905 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Температура разливки .....	$t_p = 1020 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Плотность при $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	$\gamma_{\text{м.т}} = 8500 \text{ кг/м}^3$
Плотность в жидком состоянии .....	$\gamma_{\text{м.ж}} = 8000 \text{ кг/м}^3$
Удельное сопротивление при $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	$\rho = 6,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Удельное сопротивление в жидком состоянии .....	$\rho = 40 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Теплоемкость в диапазоне температур $t = 20 \dots 905 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	$C_1 = 0,4706 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$
Теплоемкость в диапазоне температур $t = 905 \dots 1020 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	$C_2 = 0,4865 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$
Скрытая теплота плавления .....	$\lambda = 148,63 \text{ кДж/кг}$
Удельное теплосодержание при температуре $t = 1020 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	$q = 645 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$
Энтальпия при температуре $t = 1020 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	$c_p = 169 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$

#### Химический состав латуни Л63 по ГОСТ 15527–70:

Компоненты .....	%
Медь (Cu) .....	62–65
Цинк (Zn) .....	0
Примеси, %, не более	
Свинец (Pb) .....	0,07
Железо (Fe) .....	0,2
Сурьма (Sb) .....	0,005
Висмут (Bi) .....	0,002
Фосфор (P) .....	0,01
ВСЕГО .....	0,5

*Примечание.* Для антимагнитных сплавов содержание железа не должно превышать 0,03. Примеси, не указанные здесь, учитываются в общей сумме примесей. Содержание примеси никеля Ni допускается до 0,5 % за счет содержания меди.



Латунь Л63 применяют для получения полуфабрикатов: листов и полос, лент, прутков, труб, проволоки, – используемых в различных областях промышленности.

Исходя из подгл. 2.3 «Определение мощности печи», принимаем для расчета печь шахтного типа. На рис. 2.7 приведена установка полунепрерывного литья, оснащенная индукционной канальной печью шахтного типа, а на рис. 2.8 показан узел «раздаточная коробка – кристаллизатор» литейной установки.

1. Остаточную емкость (емкость болота) индукционной канальной печи устанавливают по выражению (2.2)

$$G_{\delta} = k_{\delta} G.$$

Принимаем  $k_{\delta} = 0,23$ , тогда

$$G_{\delta} = 0,23 \cdot 1,3 = 0,3 \text{ т.}$$

2. Определение полезной емкости печи производим по выражению (2.1)

$$G = G_n + G_{\delta},$$
$$G_n = G - G_{\delta} = 1,3 - 0,3 = 1 \text{ т.}$$

3. Определение ориентировочного объема жидкого металла в ванне печи по выражению (2.6).

Значение плотности сплава Л-63 в горячем состоянии принято  $\gamma_{\text{мж}} = 8000 \text{ кг/м}^3$  по данным табл. 2.2.

4. Количество тепла, необходимого для нагрева сплава Л63 массой  $G_n = 1 \text{ т}$  при теплоемкости  $C_1 = 0,4706 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}^*$  от начальной температуры  $t_n = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}^*$  до температуры плавления  $t_{\text{п}} = 905 \text{ }^{\circ}\text{C}^{**}$ , по формуле (2.12) составит

$$Q_1 = G_n C_1 (t_{\text{п}} - t_n) = 1 \cdot 10^3 \cdot 0,4706 \cdot (905 - 20) = 416\,478 \text{ кДж.}$$

$$V_{\text{в.п}} = \frac{G}{\gamma_{\text{мж}}} = \frac{1300}{8000} = 0,1625 \text{ м}^3.$$

---

\* Значение  $C_1$  для сплава Л63 можно взять со с. 56 или [13], [16], [17].

\* Значение  $t_n$  для сплава Л63 см. там же.

\*\* Значение  $t_{\text{п}}$  для сплава Л63 см. там же.

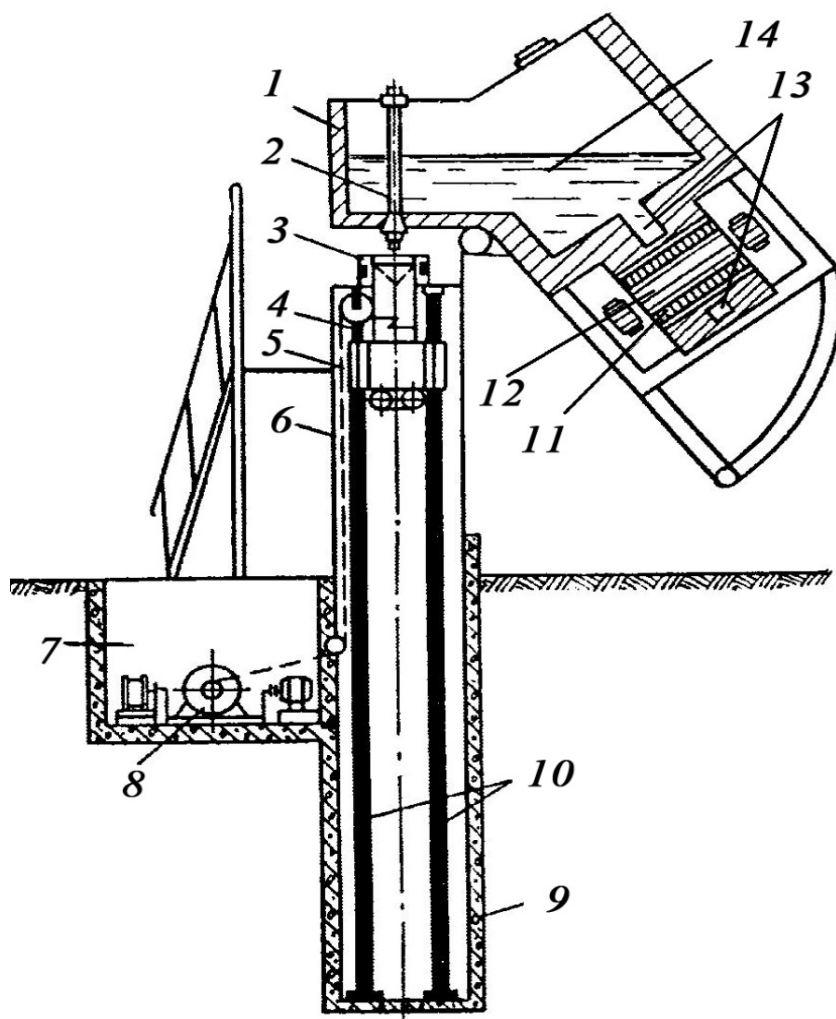


Рис. 2.7. Схема отливки слитков

на установке полунепрерывного литья:

- 1 – индукционная печь; 2 – стопор; 3 – кристаллизатор;  
 4 – поддон; 5 – направляющие; 6 – трос; 7 – приемок  
 механизма привода троса; 8 – редуктор; 9 – приемок для слитка;  
 10 – направляющие штанги; 11 – индуктор;  
 12 – печной трансформатор; 13 – канал; 14 – жидкий металл

5. Определение количества тепла, необходимого для перевода сплава Л63 массой  $G_{\text{п}} = 1 \text{ т}$  при температуре плавления  $t_{\text{п}} = 905 \text{ }^{\circ}\text{C}$  в расплавленное состояние при скрытой теплоте плавления  $\lambda = 148,63 \text{ кДж/кг}^*$ , осуществляем по формуле (2.13)

$$Q_2 = G_{\text{п}} \lambda = 1 \cdot 10^3 \cdot 148,63 = 148\,631 \text{ кДж.}$$

6. Определение количества тепла, необходимого для доведения сплава Л63 массой  $G_{\text{п}} = 1 \text{ т}$  при теплоемкости

\* Значение  $\lambda$  для сплава Л63 можно взять со с. 56 или [13], [16], [17].

$C_2 = 0,4865 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$  \*\* от температуры плавления  $t_{\text{п}} = 905^\circ\text{C}$  до температуры разливки  $t_{\text{р}} = 1020^\circ\text{C}$ \*\*\*, выполняем по формуле (2.14)

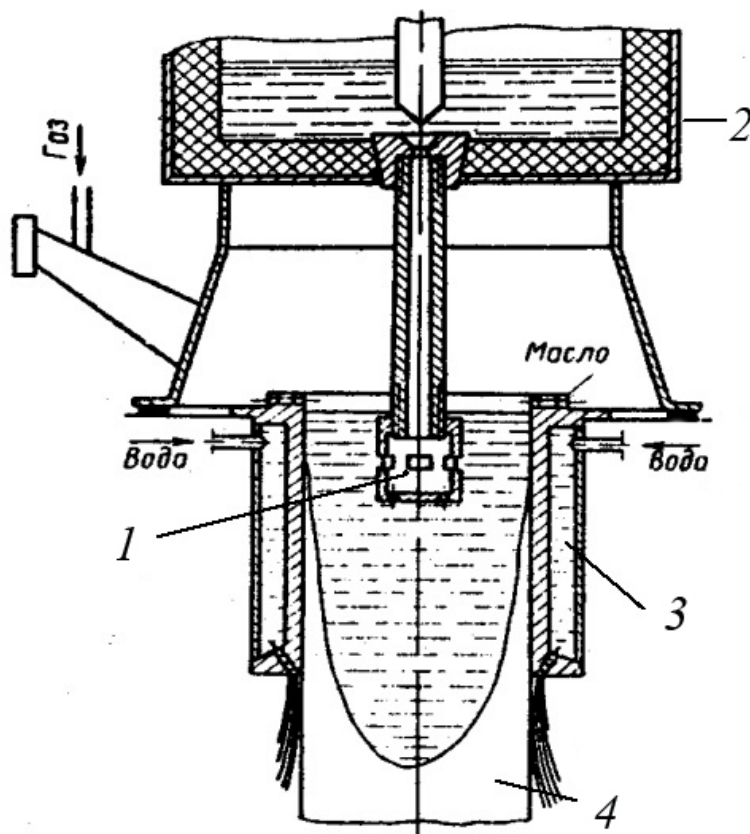
$$Q_3 = G_{\text{п}} C_2 (t_{\text{р}} - t_{\text{п}}) = 1 \cdot 10^3 \cdot 0,4865 \cdot (1020 - 905) = 55\,948 \text{ кДж}.$$


Рис. 2.8. Узел «раздаточная коробка – кристаллизатор» литейной установки:

1 – стопор; 2 – раздаточная коробка;  
3 – водоохлаждаемый кристаллизатор скольжения; 4 – слиток

7. Определение количества тепла, теоретически необходимого для расплавления и доведения до температуры разливки сплава массой  $G_{\text{п}} = 1$  т, производим по формуле (2.11)

$$Q_{\text{т}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 416\,478 + 148\,631 + 55\,948 = 621\,057 \text{ кДж}.$$

8. Определение количества тепла, необходимого для поддержания температуры массы сплава Л63  $G_6 = 0,3$  т на уровне  $t_{\text{р}}$ :

$$Q_4 = G_6 C_2 (t_{\text{р}} - t_{\text{п}}) = 0,3 \cdot 10^3 \cdot 0,4865 \cdot (1020 - 905) = 16\,784,5 \text{ кДж}.$$

\*\* Значение  $C_2$  для сплава Л63 можно взять со с. 56 или [13], [16], [17].

\*\*\* Значение  $t_{\text{р}}$  для сплава Л63 см. там же.

Полученное значение  $Q_4$  составляет всего 2,63 % от общего количества тепла, необходимого для расплавления и доведения до температуры разливки массы сплава Л63  $G = 1,3$  т. Поэтому многие авторы не учитывают в расчетах количество тепла, необходимого для поддержания температуры массы металла или сплава  $G_6$  на уровне  $t_p$ .

9. Определение количества тепла, необходимого для расплавления и доведения до температуры разливки массы сплава Л63  $G = 1,3$  т:

$$Q'_T = Q_T + Q_4,$$

$$Q'_T = 621\,057 + 16\,784,5 = 637\,841,5 \text{ кДж.}$$

10. Определение подводимой к печи активной мощности, кВт, выполняем по выражению (2.10)

$$P_n = \frac{Q'_T}{864\eta_n\tau_1}.$$

КПД индукционной канальной печи, предназначенной для расплавления сплава Л63, принимают ориентировочно равным  $\eta_n = 0,8$  (см. данные на с. 52).

Исходя из опыта проектирования и эксплуатации индукционных канальных печей принимаем производительность агрегата  $A_n = 19$  т/сут. Принимаем длительность периода нагрева и подогрева жидкого металла  $\tau_1 = 0,9$  ч, длительность разливки, загрузки, чистки и т. д.  $\tau_2 = 0,36$  ч.

Число плавов в сутки по выражению (2.4) составит

$$m_n = \frac{24}{\tau_1 + \tau_2} = \frac{24}{0,9 + 0,36} = 19,$$

что соответствует формуле (2.3)

$$m_n = \frac{A_n \cdot 10^3}{G_n} = \frac{19 \cdot 10^3}{1000} = 19.$$

Подводимая к печи активная мощность\* по выражению (2.10)

$$P_n = \frac{637\,841,5}{858,5 \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 1031,92 \text{ кВт.}$$

---

\* В источнике [3] коэффициент перевода килокалорий в [кВт·ч] рассчитан не совсем точно. По [14]  $1 \text{ ккал} = 0,278 \cdot 10^{-3} \text{ кВт·ч}$ ;  $P_n = \frac{Q'_T \cdot 0,278 \cdot 10^{-3}}{\eta_n \tau_1} = \frac{Q'_T}{358,5 \eta_n \tau_1} \text{ кВт.}$

$$P_n = \frac{637\,841,5}{864 \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 1146,58 \text{ кВт.}$$

Для оценки результатов расчета используем данные со с. 56, табл. 2.3 и рис. 2.9.

Значения коэффициентов мощности  $\cos\varphi$  в металлах и сплавах индукционных канальных печей:

Медь марки М0.....	0,40–0,50
Латунь марки Л90 .....	0,45–0,55
Латунь марки Л80 .....	0,50–0,60
Латунь марки Л63 .....	0,65–0,80
Латунь марки Л70 .....	0,60–0,80
Медно-никелевые сплавы .....	Ориентировочно или $\approx 0,8$
Цинк.....	0,50–0,60
Алюминий.....	0,30–0,40*
Чугун .....	0,60–0,80

Удельный расход электроэнергии  $W'$ , кВт·ч/т, при плавке металлов и сплавов в индукционной канальной печи [12]:

алюминиевые сплавы.....	400–500
медь марки М0.....	280–380
латунь марки Л80 .....	240–280
латунь марки Л70 .....	220–260
латунь марки Л68 .....	200–240
латунь марки Л62 .....	180–220
бронза оловянная марки БрО5 .....	280–300
бронза алюминиевая марки БрА3 .....	280–320
медноникелевые сплавы.....	300–320
никель .....	470–500
мельхиор [2].....	350–380

Удельный расход электроэнергии  $W'$ , кВт·ч/т, при плавке металлов и сплавов в индукционной канальной печи [5]:

Медь марки М0.....	270–330
Латунь марки Л90 .....	230–270
Латунь марки Л63 .....	190–240
Бронза марганцовистая марки БрМц5 .....	280–330
Алюминий марки А0 .....	350–500
Цинк.....	90–120
Чугун .....	30–35 в режиме миксера 400–500 в плавильном режиме

---

\* Низкое значение  $\cos\varphi$  связано с большим сечением канала, у крупных и особенно двухкамерных печей  $\cos\varphi$  может быть еще ниже.

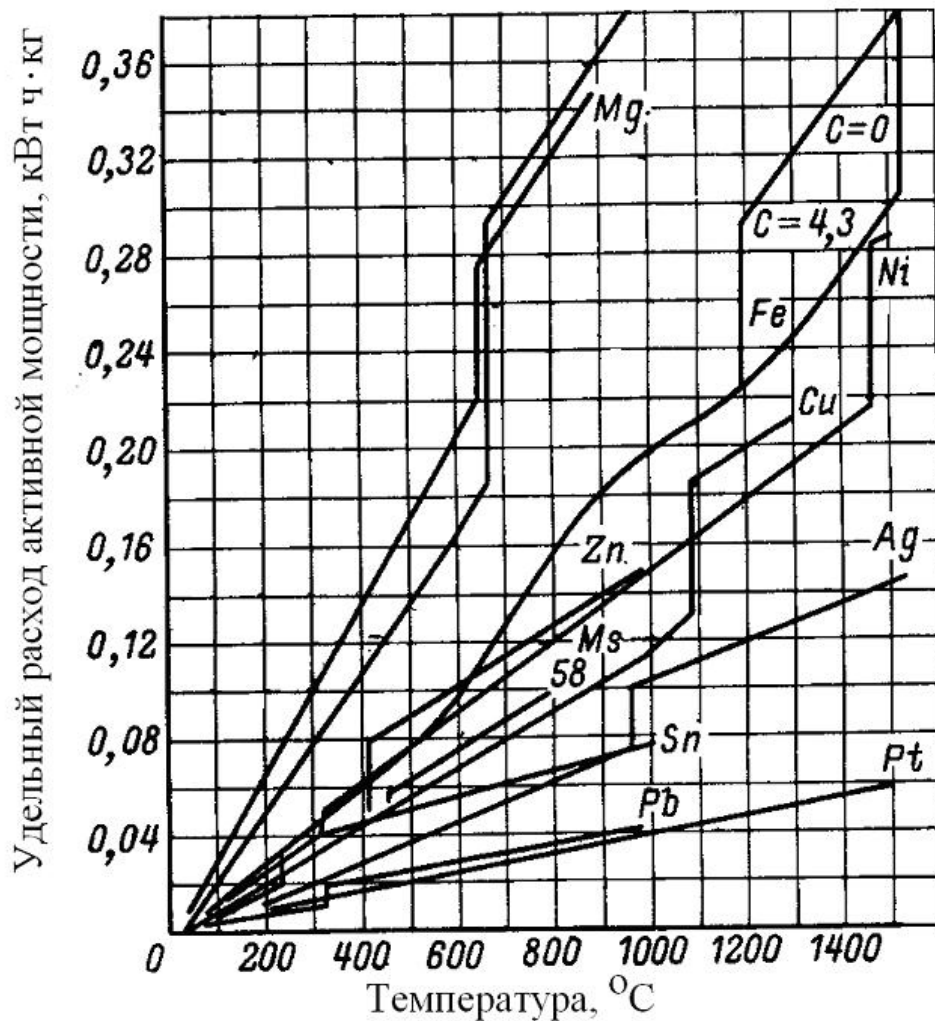


Рис. 2.9. Теоретический удельный расход активной мощности для нагрева различных металлов

Удельный расход электроэнергии при плавке латуни Л-63 [10] составляет 190–240 кВт·ч/т.

По результатам расчета удельный расход электроэнергии составит

$$W' = \frac{P_n \tau_1}{G_n} = \frac{246,47 \cdot 0,9}{1} = 221,82 \text{ кВт·ч/т},$$

что соответствует данным [10].

Полученное значение подводимой к печи активной мощности меньше 300 кВт, поэтому число индукционных единиц принимаем равным  $n=1$ , число фаз  $m=1$ .

Величина активной мощности индукционной единицы по формуле (2.17) составляет  $P = P_n/n = 246,47$  кВт.

Таблица 2.3

Рекомендуемые предельные значения удельной мощности  
и плотности тока в канале индукционной канальной печи для некоторых металлов и сплавов

Величина	Расплавляемый металл или сплав				
	медь	латунь, бронза	цинк	никель	алюминий
Удельная мощность в канале печи $P_{к.уд}$ , Вт/м <sup>3</sup>	(40...50) · 10 <sup>6</sup>	(50...60) · 10 <sup>6</sup>	(30...40) · 10 <sup>6</sup>	(50...80) · 10 <sup>6</sup>	(4...6) · 10 <sup>6</sup> в печах с вертикальными каналами; (12...15) · 10 <sup>6</sup> в печах с горизонтальными каналами
Плотность тока в канале печи $j_k$ , А/мм <sup>2</sup>	15	10	10	10	4 в печах с вертикальными каналами; 10 – в печах с горизонтальными каналами
					3,5 в режиме мик-сера; 8,0 в плавильном режиме

11. Определение полезной активной мощности и подводимой к печи активной мощности производим по выражениям (2.7), (2.8) при условии, что известна величина удельного теплосодержания латуни Л63  $q_2 = 645 \cdot 10^3$  Дж/кг при температуре разливки  $t_p = 1020$  °С [7].

В литературе для упрощения технических расчетов теплосодержание тела наиболее часто принимают равным нулю не при абсолютном нуле, а при заданном значении [14].

Величина начального теплосодержания  $q_1$  при начальной температуре  $t_n = 20$  °С незначительна, и ею пренебрегают при ориентировочных расчетах.

$$P_n = \frac{G_n q_2}{3,6 \tau_1 \eta_n} = \frac{1 \cdot 645 \cdot 10^3}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 248,843 \text{ кВт.}$$

Величина активной мощности индукционной единицы составляет  $P = P_n / n = 248,843$  кВт.

12. Определение подводимой к печи активной мощности по выражению (2.9) при условии, что известна величина энтальпии латуни Л63  $C_p = 169$  Вт·ч/кг, при температуре разливки  $t_p$  1020 °С [6] осуществляем по уравнению

$$P_n = \frac{G_n c_p}{\tau_1 \eta_n} = \frac{1000 \cdot 169}{0,9 \cdot 0,8} = 234\,722,22 \text{ Вт} = 234,72 \text{ кВт.}$$

Тогда величина активной мощности индукционной единицы составит  $P = P_n / n = 234,72$  кВт.

13. Определение полной мощности печи выполняется по выражению (2.15)

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi}.$$

Коэффициент мощности индукционной канальной печи, предназначенный для расплавления сплава Л63, принимают ориентировочно равным  $\cos \varphi = 0,75$  (см. данные на с. 56).

При соответствующей активной мощности полная мощность печи равна

$$S_n = \frac{246,47}{0,75} = 328,62 \text{ кВ} \cdot \text{А}, \quad S_n = \frac{248,84}{0,75} = 331,79 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

$$S_n = \frac{234,72}{0,75} = 312,96 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$



Поскольку в печи используют одну индукционную единицу, постольку полная мощность индукционной единицы равна полной мощности печи,  $S = S_n$ . Полученное значение полной мощности индукционной канальной печи позволяет подобрать типовой электропечной трансформатор [18] с номинальной мощностью  $S_{\text{ном}} = 400 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ . Тип трансформатора ЭПОМ-350, число фаз – 1, напряжение первичное – 6 или 10 кВ, вторичное – 414–298 В.

## 2.4. Расчет индукционной единицы

Расчет индукционной единицы включает в себя расчет печного трансформатора, индуктора и канала печи.

### 2.4.1. Предварительная оценка сечения магнитопровода печного трансформатора

Исходя из предположения, что напряжение индуктора печи  $U_{\text{и}}$  равно его электродвижущей силе  $E_{\text{и}}$ , и используя известные выражения (2.18)–(2.22), определяют поперечное сечение магнитопровода печного трансформатора (2.26).

$$S_{\text{п}} = U_{\text{и}} I_{\text{и}} \approx E_{\text{и}} I_{\text{и}}, \quad (2.18)$$

$$U_{\text{и}} = U_{\text{1-го витка}} N_{\text{и}}, \quad (2.19)$$

$$E_{\text{и}} = 4,44 f N_{\text{и}} \Phi_m, \quad (2.20)$$

$$\Phi_{\text{т}} = B_{\text{т}} S'_{\text{с}}, \quad (2.21)$$

$$I_{\text{и}} = j_{\text{м}} S'_{\text{м}}, \quad (2.22)$$

где  $S_{\text{п}}$  – полная мощность индукционной канальной печи, В·А;

$E_{\text{и}}$  – ЭДС индуктора канальной печи, В;

$U_{\text{1-го витка}}$  – межвитковое напряжение в индукторе, В;

$f_1$  – частота питающей сети, Гц.

Все индукционные канальные печи работают при частоте 50 Гц, поскольку достаточно высокий электрический КПД системы индуктор – канал может быть обеспечен на этой частоте при любом удельном сопротивлении расплавляемого металла и выполнении условия  $d_2 \leq 0,75 \Delta_2$  ( $d_2$  – радиальный размер канала печи,  $\Delta_2$  – глубина проникновения тока в расплавленный металл);

$N_{\text{и}}$  – число витков индуктора;

$\Phi_{\text{т}}$  – магнитный поток в магнитопроводе печного трансформатора, Вб;

$B_T$  – магнитная индукция в магнитопроводе печного трансформатора, Тл ( $\text{Тл} = \text{Вб/м}^2$ ). Допустимую величину магнитной индукции  $B$  в магнитопроводе печного трансформатора ввиду тяжелых условий работы принимают меньшей, чем в обычных силовых трансформаторах. Например, для электротехнической стали 1511 величина  $B \leq 1,3 \text{ Тл}$ ;

$S'_c$  – поперечное сечение магнитопровода печного трансформатора,  $\text{м}^2$ ;

$I_{\text{и}}$  – ток в индукторе, А;

$j_m$  – плотность тока в индукторе,  $\text{А/м}^2$ . По практическим данным при воздушном охлаждении индуктора плотность тока не должна превышать  $4 \text{ МА/м}^2$ , а при водяном охлаждении должна быть не более  $20 \text{ МА/м}^2$ ;

$S'_m$  – поперечное сечение проводника индуктора,  $\text{м}^2$ .

На основании опыта проектирования и эксплуатации индукционных канальных печей и с учетом качества материала межвитковой изоляции индуктора межвитковое напряжение в индукторе печного трансформатора принимают 6–7 В на один виток на малых печах и 12–20 В на один виток на больших печах [5]. По данным [1] межвитковое напряжение принимают 7–10 В на один виток.

$$S_c = \frac{U_{\text{1-го витка}}}{4,44 f B_T}. \quad (2.23)$$

$$S'_c = \frac{6 \dots 7}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2} = 0,022 \ 52 \dots 0,026 \ 276 = (225,2 \dots 262,76) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$S'_c = \frac{12 \dots 20}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2} = 0,0450 \dots 0,075 \ 07 = (450,0 \dots 750,7) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$S'_c = \frac{7 \dots 10}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2} = 0,026 \ 276 \dots 0,375 \ 375 = (262,76 \dots 375,375) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Таким образом, ориентировочное значение величины сечения магнитопровода печного трансформатора может изменяться в довольно широком диапазоне.

#### **2.4.2. Расчет поперечного сечения магнитопровода печного трансформатора**

При введении дополнительных коэффициентов и обозначений поперечное сечение магнитопровода,  $\text{м}^2$ , определяют по выражению

$$S'_c = C \sqrt{P \Psi / B_T j_m f_1 \cos \varphi}, \quad (2.24)^*$$

где  $C$  – коэффициент, зависящий от конструкции трансформатора печи,  $C = 0,51 \sqrt{\frac{l_{M(l)}}{l_c}}$ ;

$\psi$  – коэффициент, зависящий от отношения массы стали  $m_c$  печного трансформатора к массе меди  $m_m$  обмотки индуктора,  $\psi = \frac{S'_c l_c \gamma_c}{S'_m l_{M(l)} N_m \gamma_m} = \frac{m_c}{m_m}$ .

Входящие в выражения для определения коэффициентов  $C$  и  $\psi$  величины  $l_m$  и  $l_c$  обозначают соответственно длину одного витка индуктора и общую длину магнитопровода (всех стержней и ярем) в метрах.

При расчете приняты значения плотности электротехнической стали  $\gamma_c = 7,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, плотности меди обмотки  $\gamma_m = 8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствует коэффициенту 0,51 в определении коэффициента  $C$ . Исходя из практических результатов принято для однофазного броневого трансформатора  $C \approx 0,28 \dots 0,34$ ; для стержневого трансформатора  $C \approx 0,27 \dots 0,30$ , для трехфазного трансформатора  $C \approx 0,12 \dots 0,20$ ; для трехфазного броневого пятикернавого  $C \approx 0,17 \dots 0,20$ .

При принудительном воздушном охлаждении индуктора  $\psi \approx 5 \dots 25$ ; при водяном охлаждении для печей, плавящих медь, алюминий и цинк,  $\psi \approx 25 \dots 30$ ; для печей-накопителей чугунолитейных цехов  $\psi \approx 80$ .

Площадь сечения стержня печного трансформатора с учетом межлистовой изоляции составит, м<sup>2</sup>,

$$S_c = \frac{S'_c}{k_3} \quad (2.25)$$

---

\* Выражение (2.24) получено следующим образом:

$$\begin{aligned} P &= S \cos \varphi = 4,44 f_1 N_m B_T S'_c j_m S'_m \cos \varphi \rightarrow S'_c = \frac{P}{4,44 f_1 N_m B_T j_m S'_m \cos \varphi} \rightarrow \\ (S'_c)^2 &= \frac{P}{4,44 f_1 N_m B_T j_m \cos \varphi} \frac{S'_c}{S'_m} \rightarrow \\ (S'_c)^2 \frac{l_c \gamma_c}{l_{M(l)} \gamma_m} &= \frac{P}{4,44 f_1 B_T \cos \varphi} \frac{S'_c l_c \gamma_c}{S'_m l_{M(l)} N_m \gamma_m} = \frac{P}{4,44 f_1 B_T \cos \varphi} \psi \rightarrow \\ S'_c &= \sqrt{\frac{P \psi l_{M(l)} \gamma_m}{4,44 f_1 B_T j_m \cos \varphi l_c \gamma_c}} = 0,51 \sqrt{\frac{l_{M(l)}}{l_{ct}}} \cdot \sqrt{\frac{P \psi}{f_1 B_T j_m \cos \varphi}} = C \sqrt{\frac{P \psi}{f_1 B_T j_m \cos \varphi}}. \end{aligned}$$

где  $k_3$  – коэффициент заполнения сталью [13], его значения см. в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Значения коэффициента заполнения сталью  $k_3$   
магнитопровода печного трансформатора

Вид изоляции	Толщина стального листа, $k_3$	
	0,35 мм	0,50 мм
Лаковая изоляция толщиной 0,01 мм	0,90–0,91	0,92–0,93
Оксидированное покрытие	0,93	0,95

Магнитопровод печного трансформатора изготавливают из листовой электротехнической стали, ярмо выполняют съемным из-за необходимости регулярной сборки и разборки.

Для устранения нагрева в месте стыка прижимное ярмо отделяется от стержней изолирующими прокладками толщиной 0,25–0,5 мм из электрокартона или миканита.

На рис. 2.10 [5] показан применяемый способ стяжки листов трансформаторной стали, ярма и стержней.

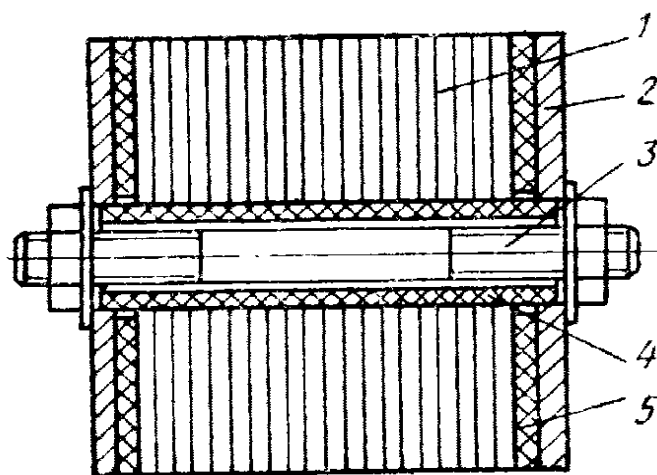


Рис. 2.10. Способ стяжки листов трансформаторной стали магнитопровода печного трансформатора:

1 – пакет магнитопровода; 2 – накладки из немагнитного металла; 3 – стальные шпильки; 4 – миканитовые трубки; 5 – асбестовые накладки

Пакет магнитопровода 1 сжимается накладками 2 из немагнитного металла с помощью стальных шпилек 3. Диаметр шпилек

выбирается в пределах 12–16 мм, а расстояние между ними обычно составляет 120–240 мм. Среднее давление сжатия листов должно быть не менее  $0,30 \text{ МН/м}^2$ . Допускаемое напряжение в шпильке достигает  $90 \text{ МН/м}^2$ . Шпильки изолируют от листов трансформаторной стали фибровыми, бакелитовыми или миканитовыми трубками 4, а накладки – листовым миканитом или асбестом 5.

Форма поперечного сечения стержня при небольшой мощности трансформатора квадратная или прямоугольная, а при значительной мощности – крестообразная или ступенчатая.

Для печного трансформатора с магнитопроводом стержневого типа сечение стержня равно сечению ярма  $S_{\text{ст}} = S_{\text{яр}}$ , а для броневоего –  $S_{\text{яр}} = \frac{S_{\text{см}}}{2}$ .

Между стержнем и индуктором помещают изолирующую бумажно-бакелитовую или стеклотекстолитовую гильзу, закрепленную деревянными клиньями. Толщина изолирующей гильзы составляет  $d_r = (0,5 \dots 1,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Внутренний диаметр изолирующей гильзы,  $m$ , определяют по выражению

$$D_r = \sqrt{4S_c / \pi k_\phi}, \quad (2.26)$$

где  $k_\phi$  – коэффициент заполнения круга диаметром  $D_r$ , зависящий от формы сечения стержня, или коэффициент заполнения материалом сердечника окружности, описанной вокруг него. Для квадратного сечения  $k_\phi = 0,64$ . Для ступенчатого сечения при числе ступеней 2, 3, 4 и 5 соответственно  $k_\phi = 0,785; 0,81; 0,83; 0,85$ . Чем выше мощность печного трансформатора, тем больше число ступеней сердечника.

Выбрав число ступеней, можно найти самую выгодную ширину каждой ступени, дающую наибольшую величину для коэффициента  $k_\phi$ .

Однако для того чтобы разместить детали прессовки сердечника (гайки, головки болтов, нажимные и изолирующие пластины и т. д.), на практике при числе ступеней больше двух приходится отступать от наивыгоднейшей (с точки зрения наибольшего заполнения) ширины каждой ступени. В табл. 2.5 даны значения для ширины каждой ступени.

## ПРИМЕР 2

Этот пример является продолжением задачи, изложенной в примере 1.

Рассчитать сечение магнитопровода печного трансформатора индукционной канальной печи шахтного типа для плавки латуни Л63.

Рассчитать внутренний диаметр изолирующей гильзы, помещаемой между стержнем магнитопровода печного трансформатора и индуктором.

Исходные данные для примера 2 приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Значения ширины ступеней стержня  
магнитопровода печного трансформатора

Число ступеней	Наивыгоднейшие размеры ступеней в долях диаметра круга, описанного около сечения стержня сердечника	Практические размеры ступеней в долях диаметра круга, описанного около сечения стержня сердечника
1	$b_1 = 0,707;$	$b_1 = 0,707$
2	$b_1 = 0,85; b_2 = 0,525$	$b_1 = 0,85; b_2 = 0,525$
3	$b_1 = 0,905; b_2 = 0,707; b_3 = 0,424$	$b_1 = 0,85; b_2 = 0,665; b_3 = 0,4$
4	$b_1 = 0,935; b_2 = 0,8; b_3 = 0,6; b_4 = 0,355$	$b_1 = 0,88; b_2 = 0,752; b_3 = 0,564; b_4 = 0,334$
5	$b_1 = 0,95; b_2 = 0,848; b_3 = 0,707; b_4 = 0,532; b_5 = 0,312$	$b_1 = 0,894; b_2 = 0,796; b_3 = 0,665; b_4 = 0,5; b_5 = 0,293$

Число индукционных единиц  $n = 1$ , полная емкость печи 1,3 т, подводимая к печи активная мощность  $P_n = 247$  кВт определяются по исходным данным и результатам, полученным в примере 1.

Для расчета принимаем печной однофазный трансформатор стержневого типа (рис. 2.11), максимальное значение индукции  $B_T = 1,2$  Тл, коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,75$  (из примера 1), охлаждение индуктора водяное, плотность тока в индукторе  $j_m = 11,5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, значение коэффициентов  $\psi = 28$ ,  $C = 0,27$ .

1. Определение поперечного сечения магнитопровода печного трансформатора без учета межлистовой изоляции производим по выражению (2.24).

Подставив заданные значения, получаем

$$S'_c = C \sqrt{P \Psi / B_T j_m f_1 \cos \varphi} = 0,27 \cdot \sqrt{\frac{247 \cdot 10^3 \cdot 28}{1,2 \cdot 11,5 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 0,75}} = 0,0312 \text{ м}^2.$$

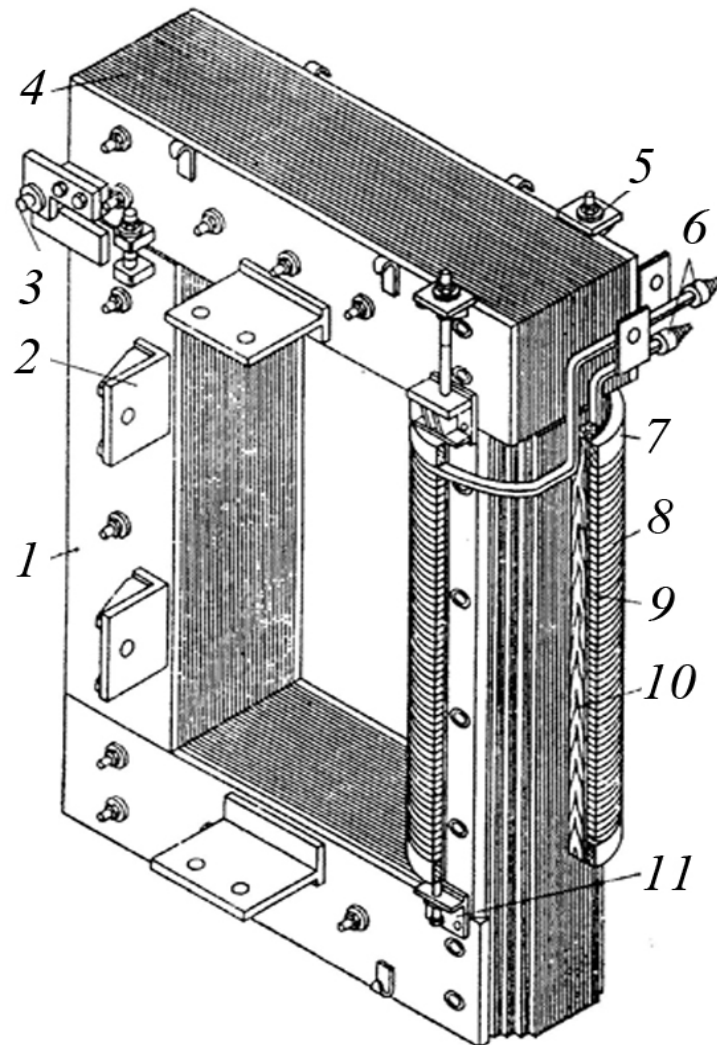


Рис. 2.11. Внешний вид печного трансформатора стержневого типа с индуктором:

- 1 – магнитопровод; 2 – кронштейны для крепления трансформатора на каркасе подового камня;
- 3 – ось поворота ярма; 4 – ярмо магнитопровода;
- 5 – узел для прижатия ярма к стержням;
- 6 – выводы индуктора; 7 – изоляционная прокладка;
- 8 – катушка индуктора; 9 – изолирующий цилиндр;
- 10 – изоляционный брус; 11 – узел для стяжки индуктора

2. Определение поперечного сечения магнитопровода печного трансформатора с учетом межлистовой изоляции – по выражению (2.25).

Для расчета принимаем коэффициент заполнения сталью  $k_3 = 0,95$ , соответствующий толщине листа электротехнической стали 0,5 мм с оксидированным покрытием.

$$S_c = \frac{S'_c}{k_3} = \frac{0,0312}{0,95} = 0,03284 \text{ м}^2.$$

Это значение соответствует ориентировочному значению величины сечения магнитопровода печного трансформатора [2], рассчитанному по выражению (2.23) при межвитковом напряжении 7–10 В на один виток. Для однофазного печного трансформатора стержневого типа  $S_{ст} = S_{я} = 0,03286 \text{ м}^2$ .

3. Определение внутреннего диаметра изолирующей гильзы производится по формуле (2.26).

При расчете внутреннего диаметра изолирующей гильзы принимаем ступенчатое сечение стержня магнитопровода печного трансформатора с числом ступеней 4  $k_{\phi} = 0,83$ . В таком случае

$$D_r = \sqrt{4S_c / (\pi k_{\phi})} = \sqrt{4 \cdot 0,03286 / (\pi \cdot 0,83)} = 0,2245 \text{ м}.$$

Практические размеры ступеней стержня магнитопровода, рассчитанные по данным табл. 2.5, равны  $b_1 = 0,198 \text{ м}$ ,  $b_2 = 0,169 \text{ м}$ ,  $b_3 = 0,127 \text{ м}$ ,  $b_4 = 0,080 \text{ м}$ .

Для последующих расчетов принимают для изолирующей гильзы из стеклотекстолита толщину стенки  $d_r = 6 \text{ мм}$ .

#### **2.4.3. Расчет геометрических размеров и числа витков индуктора. Расчет геометрических размеров магнитопровода печного трансформатора**

Внутренний диаметр индуктора  $D_1$  определяют по выражению, м,

$$D_1 = D_r + 2d_r, \quad (2.27)$$

где  $D_r$  – внутренний диаметр изолирующей гильзы,

$d_r$  – толщина изолирующей гильзы.

Число витков индуктора  $N_{и}$  рассчитывают на основании выражений (2.19), (2.21), (2.22)

$$N_{и} = \frac{U_{и}}{4,44 f B_r S_c}. \quad (2.28)$$

Номинальное напряжение на индукторе не превышает 1000 В и чаще всего соответствует стандартному напряжению сети 220, 380 или 500 В при питании от электропечного трансформатора. Питание от сетей напряжением 6600 В и 10 000 В производят только через трансформаторы.

Ток индуктора определяют по выражению, А,



$$I_{\text{и}} = \frac{P_{\text{п}}}{U_{\text{и}} \cos \varphi}. \quad (2.29)$$

Площадь сечения проводника индуктора составляет,  $\text{м}^2$ ,

$$S'_{\text{м}} = \frac{I_{\text{и}}}{j_{\text{м}}}. \quad (2.30)$$

При воздушном охлаждении индуктора, как правило, применяют провод прямоугольного сечения, который наматывают на ребро при однослойном варианте. Провод круглого сечения применяют лишь в том случае, если его диаметр не превышает 6 мм.

При водяном охлаждении проводом служит неравностенная медная трубка толщиной рабочей стенки (обращенной к каналу) 10–15 мм или равностенная – толщиной стенки 2–5 мм (рис. 2.12).

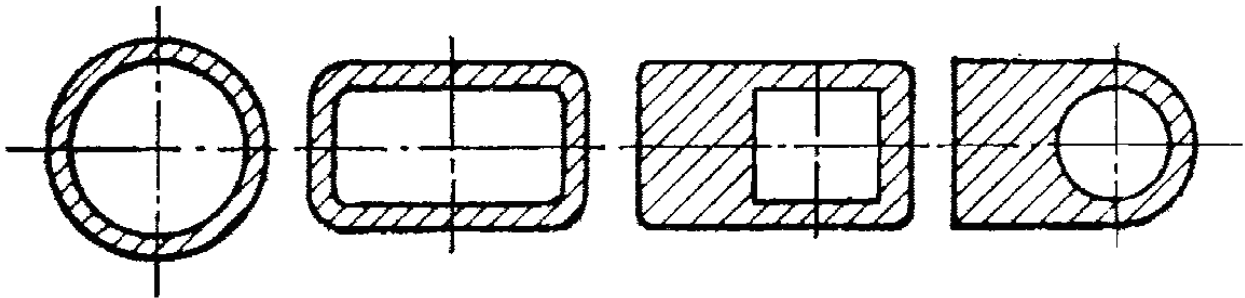


Рис. 2.12. Профили медной трубки, используемой для изготовления индукторов

Размеры трубки выбирают в соответствии с сортаментом выпускаемых промышленностью медных трубок по ГОСТ 16774–78 (табл. 2.6, 2.7).

Индуктор изолируют киперной, асбестовой лентой или лентой из стеклоткани  $\delta_{\text{из.а}} = 2 \dots 3 \text{ мм}$ ,  $\delta_{\text{из.ст.т.}} = 1 \dots 2 \text{ мм}$ .

Таблица 2.6

Параметры медной профилированной трубки, мм, для индукторов промышленной частоты

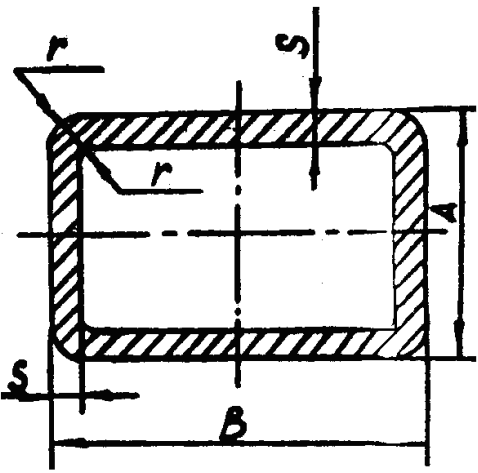
Эскиз	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>
	16	22	8	28	34	20
	18	24	10	30	36	22
	20	26	12	32	38	24
	22	28	14	34	40	26
	24	30	16	36	42	28

	26	32	18	38	44	30
--	----	----	----	----	----	----

Примечание. Размер  $C = 10$  мм для всех трубок.

Таблица 2.7

Стандартный медный прямоугольный профиль, мм

Поперечное сечение	$A$	$B$	$S$
 <p>Радиус закругления <math>r = 4 \cdot 10^{-3}</math> м, длина трубки не менее 30 м</p>	16	12	2,0
	16	15	2,5
	18	16	2,5
	20	15	2,5; 4
	22	15	2,5; 4
	25	15	2,5; 4
	25	20	3; 4
	28	20	3; 4
	32	20	3; 4
	35	25	3; 4
	40	30; 40	3; 4
	45	30; 40	3; 4; 5
	45	40; 30	3; 4; 5
	50	30; 40	4; 6
	55	40	4; 6
	58	30	4
	60	40	4; 6
	70	50	8

Индуктор, как правило, выполняют однослойным, в редких случаях – двухслойным. Двухслойный вариант исполнения индуктора значительно сложнее конструктивно и имеет более низкий коэффициент мощности.

Форму витков индуктора принимают обычно круговую, лишь у печей для плавки алюминия, каналы которых состоят из прямолинейных отрезков, а сердечник всегда имеет прямоугольное сечение, витки индуктора также делают прямоугольными.

При выборе провода индуктора с целью обеспечить минимум электрических потерь в индукторе рекомендуют соблюдать условие

$$d_1 \geq 1,57 \Delta_1$$

где  $d_1$  – радиальный размер провода индуктора;  $\Delta_1$  – глубина проникновения тока в материал индуктора.

Глубину проникновения тока в материал индуктора определяют по выражению, м,

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu 2\pi f}}, \quad (2.31)$$

где  $\rho_1$  – удельное сопротивление материала индуктора, Ом·м;

$\mu$  – магнитная проницаемость материала индикатора, Гн/м,

$\mu = \mu_0 \mu_r$ .

Здесь  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;

$f$  – частота питающей сети,  $c^{-1}$ .

Осевой размер индуктора составляет, м,

$$a_{\text{и}} = N_{\text{и}} (a_1 + 2\delta_{\text{из}}), \quad (2.32)$$

где  $a_1$  – осевой размер провода индуктора;

$\delta_{\text{из}}$  – толщина межвитковой изоляции.

Осевой размер провода индуктора для шинки прямоугольного сечения, м, определяется как

$$a_1 = \frac{S'_M}{d_1} \quad (2.33)$$

Площадь сечения проводника индуктора, выполненного из трубки прямоугольного сечения, составит,  $m^2$ ,

$$S'_M = a_1 d_1 - [(a_1 - 2\delta_{\text{ст}})(d_1 - 2\delta_{\text{ст}})], \quad (2.34)$$

где  $\delta_{\text{ст}}$  – толщина стенки трубки прямоугольного сечения.

По рекомендациям [2], [13] для ориентировочной оценки  $a_1$  используют коэффициент заполнения индуктора  $k_{\text{зи}} = \frac{a_1}{\tau_{\text{в}}} = 0,6 \dots 0,9$ ,

где  $\tau_{\text{в}}$  – шаг витка (рис. 2.13).

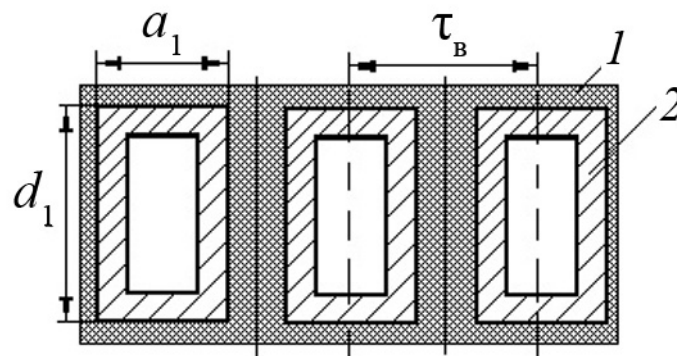


Рис. 2.13. Элемент обмотки индуктора:

$1$  – изоляция;  $2$  – медная трубка

По данным [2]  $k_{зи} = 0,75 \dots 0,90$ , по [13]  $k_{зи} = \frac{a_1}{\tau_B} = 0,60 \dots 0,90$ .

После выбора обмоточного провода по справочной литературе уточняют размеры  $a_1$  и  $d_1$ .

Наружный диаметр индуктора принимают, м,

$$D_{1и} = D_1 + 2d_1 + 4\delta_{из}. \quad (2.35)$$

Средний диаметр индуктора составляет, м,

$$D_{и} = \frac{D_1 + D_{1и}}{2}. \quad (2.36)$$

Исходя из опыта проектирования, создания и эксплуатации индукционных канальных печей установлено соотношение между осевой длиной индуктора  $a_{и}$  и длиной стержня  $l_{ст}$  магнитопровода печного трансформатора

$$k_{3.ст} = \frac{a_{и}}{l_{ст}}.$$

По рекомендациям [2], [13] принимаем  $k_{3.ст} = 0,8 \dots 0,9$ .

Длина стержня магнитопровода печного трансформатора

$$l_{ст} = \frac{a_{и}}{k_{3.с}}. \quad (2.37)$$

Длина одного витка меди индуктора составляет

$$l_{м(1)} = \pi D_{и}. \quad (2.38)$$

Используя коэффициент  $C = 0,51 \sqrt{\frac{l_{м(1)}}{l_c}}$ , определяют полную длину магнитопровода

$$l_c = \frac{0,2601 l_{м(1)}}{C^2}. \quad (2.39)$$

Длина ярма магнитопровода равна

$$l_{яр} = l_c - l_{ст}. \quad (2.40)$$

Длины отдельных участков магнитопровода в зависимости от типа магнитопровода рассчитывают по эскизу. Например, для однофазного печного трансформатора стержневого типа (рис. 2.14) длина участка составляет  $l_{2с} = l_{ст}$ , а длины участков  $l_{1с} = l_{3с}$ .

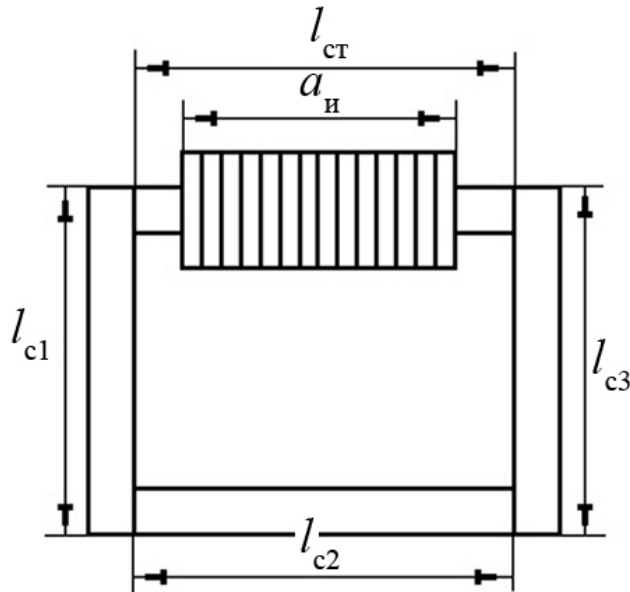


Рис. 2.14. Печной трансформатор стержневого типа

Массу меди индуктора определяют по выражению, кг,

$$m_m = \gamma_m l_{m(1)} N_{\text{и}} S'_m. \quad (2.41)$$

Массу стали магнитопровода определяют по выражению, кг,

$$m_c = \gamma_c l_c S'_c. \quad (2.42)$$

### ПРИМЕР 3

Этот пример является продолжением задач, изложенных в примерах 1 и 2.

Для индукционной канальной печи шахтного типа, предназначенной для плавки латуни Л-63, рассчитать геометрические размеры магнитопровода печного трансформатора стержневого типа.

Рассчитать геометрические размеры индуктора, а также число витков индуктора.

Исходные данные: по данным предыдущих расчетов принимаем число индукционных единиц  $n = 1$ , подводимая к печи мощность  $P_n = 247$  кВт, коэффициент мощности печи  $\cos \varphi = 0,75$ , максимальное значение индукции  $B_T = 1,2$  Тл, плотность тока в индукторе  $j_m = 11,5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, напряжение на вторичной обмотке питающего электропечного трансформатора  $U_{2_m} = 414 \dots 208$  В (из результатов расчета первого примера) и результаты расчетов примеров 1 и 2.

1. Внутренний диаметр индуктора определяют по выражению (2.27)

$$D_1 = D_r + 2d_r = 0,2245 + 2 \cdot 0,006 = 0,2365 \text{ м.}$$

Значения  $D_r$  и  $d_r$  приняты из примера 2.

2. Число витков индуктора определяют по формуле (2.28)]. Напряжение на индукторе принимаем равным стандартному  $U_{\text{и}} = 380 \text{ В}$ , значение  $S_c$  – из примера 2.

$$N_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{4,44 f_1 B_T S_c} = \frac{380}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 0,03286} = 43,409.$$

В таком случае  $N_{\text{и}} = 43$  витка.

3. Ток индуктора определяют по выражению (2.29)

$$I_{\text{и}} = \frac{P_{\text{и}}}{U_{\text{и}} \cos \varphi} = \frac{247 \cdot 10^3}{380 \cdot 0,75} = 866,67 \text{ А.}$$

4. Площадь сечения проводника индуктора определяют по выражению (2.30)

$$S'_m = \frac{I_{\text{и}}}{j_m} = \frac{866,67}{11,5 \cdot 10^6} = 0,7536 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

5. Глубину проникновения тока в материал индуктора определяют по формуле (2.31)

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu 2\pi f}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2\pi \cdot 50}} = 0,0100658 \text{ м.}$$

Значение удельного сопротивления материала индуктора (медь)  $\rho = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  принято по данным [6].

6. Оценка величины радиального размера  $d_1$  провода индуктора при условии  $d_1 \geq 1,57\Delta_1$  составит

$$d_1 \geq 1,57 \cdot 0,0100658 = 0,015803 \text{ м.}$$

7. В качестве провода индуктора принимаем медную трубку прямоугольного сечения (рис. 2.12 со с. 68) размерами: радиальный  $d_1 = 15 \text{ мм}$ , осевой  $a_1 = 10 \text{ мм}$  и толщина стенки 2 мм.

8. Сечение меди  $S'_m$  индуктора составит

$$S'_m = (10 \cdot 15) - [(10 - 4) \cdot (15 - 4)] = 84 \text{ мм}^2.$$

9. Предварительную оценку толщины межвитковой изоляции, приходящейся на один виток индуктора, производят с использованием коэффициента заполнения индуктора  $k_{3,и} = \frac{a_1}{\tau_B}$ .

Для расчета принимаем  $k_{3,и} = 0,83$ .

$$\delta_{\text{из}} = \frac{a_1/k_{3,и} - a_1}{2} = \frac{a_1 - a_1 k_{3,и}}{2k_{3,и}} = \frac{a_1(1 - k_{3,и})}{2k_{3,и}}.$$

$$\delta_{\text{из}} = \frac{a_1(1-0,83)}{2 \cdot 0,83} = 1,02 \text{ мм.}$$

Принимаем  $\delta_{\text{из.с.тк}} = 1 \text{ мм.}$

10. Осевой размер индуктора определяют по выражению (2.32)

$$a_{\text{и}} = N_{\text{и}}(a_1 + 2\delta_{\text{из}}) = 43 \cdot (10 + 2) = 516 \text{ мм.}$$

11. Наружный диаметр индуктора определяют по формуле (2.35)

$$\begin{aligned} D_{\text{ли}} &= D_1 + 2d_1 + 4\delta_{\text{из}} = 0,2365 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = \\ &= 236,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 260,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \end{aligned}$$

12. Средний диаметр индуктора определяют по формуле (2.36)

$$D_{\text{и}} = \frac{D_1 + D_{\text{ли}}}{2} = \frac{0,2365 + 0,2605}{2} = 0,2485 \text{ м.}$$

13. Длину стержня магнитопровода печного трансформатора определяют по выражению (2.37).

Принимаем для расчета  $k_{3,с} = 0,9$ ,

$$l_{\text{ст}} = \frac{a_{\text{и}}}{k_{3,с}} = \frac{516}{0,9} = 533,33 \text{ мм.}$$

14. Длину одного витка меди индуктора определяют по формуле (2.38)

$$l_{\text{м(1)}} = \pi D_{\text{и}} = \pi \cdot 0,2485 = 0,780\,295 \text{ м.}$$

15. Полную длину магнитопровода определяют по формуле (2.39)

$$l_{\text{с}} = \frac{0,2601 l_{\text{м(1)}}}{C^2} = \frac{0,2601 \cdot 0,780\,685}{0,27^2} = 2,785 \text{ м.}$$

16. Длину ярма магнитопровода определяют по выражению (2.40)

$$l_{\text{яр}} = l_{\text{с}} - l_{\text{ст}} = 2,785 - 0,5333 = 2,251\,67 \text{ м.}$$

17. Длины отдельных участков магнитопровода определяют как

$$l_{\text{с2}} = l_{\text{ст}} = 533,33 \text{ мм} = 0,533\,33 \text{ м;}$$

$$l_{\text{с1}} = l_{\text{с3}} = \frac{l_{\text{с}} - 2l_{\text{ст}}}{2} = \frac{2,785 - 2 \cdot 0,5333}{2} = 0,8592 \text{ м.}$$

18. Массу меди индуктора определяют по формуле (2.41)

$$m_{\text{м}} = \gamma_{\text{м}} l_{\text{м(1)}} N_{\text{и}} S'_{\text{м}} = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 0,780\,685 \cdot 43 \cdot 84 \cdot 10^{-6} = 25,0965 \text{ кг.}$$

19. Массу стали магнитопровода определяют по уравнению (2.42)

$$m_c = \gamma_c l_c S'_c = 7,7 \cdot 10^3 \cdot 2,785 \cdot 0,0312 = 669,068 \text{ кг.}$$

20. Оценка значения коэффициента  $\psi$

$$\psi = \frac{m_c}{m_m} = \frac{669,068}{25,0965} = 26,6598.$$

Исходное значение  $\psi = 28$ .

Расхождение между значением коэффициента  $\psi$  и полученным по результатам расчета составляет 4,786 %, что вполне приемлемо для инженерного расчета.

#### **2.4.4. Расчет геометрических размеров канальной части индукционной единицы**

Диаметр проема подового камня, м, определяют по выражению

$$D_n = D_{ли} + 2d_b, \quad (2.43)$$

где  $d_b$  – расстояние от наружной поверхности индуктора до внутренней поверхности проема подового камня.

При воздушном охлаждении подового камня рекомендуется принимать  $d_b \geq 0,015$  м. При водяном охлаждении подового камня также рекомендуется применять и воздушное охлаждение. Для водяного охлаждения применяют кессон, пустотелый разрезной цилиндр (или коробку при квадратном сечении подового камня) из нержавеющей стали с циркулирующей в нем водой для охлаждения.

Внутренний диаметр канала на уровне оси стержня магнитопровода определяют по выражению, м,

$$D_k = D_n + 2d_\phi, \quad (2.44)$$

где  $d_\phi$  – толщина футеровки между каналом и проемом подового камня.

Во избежание снижения коэффициента мощности электропечи толщина футеровки должна быть минимальной. Исходя из опыта проектирования и эксплуатации индукционных канальных печей. предложены рекомендации [6] по величине  $d_\phi$ . В зависимости от гидростатического давления металла в канале и прочности материала футеровки величину толщины футеровки  $d_\phi$  изменяют в пределах 0,05...0,13 м, для медных сплавов и цинка – 0,065...0,7 м, при плавке алюминия 0,07...0,12 м. По рекомендациям [2] для современных индукционных канальных печей отношение наружного диаметра индуктора к внутреннему диаметру канала  $D_{ли}/D_k$  составит 0,065...0,75.



Расстояние между устьями канала по средней линии на уровне оси стержня магнитопровода печного трансформатора определяют по выражению, м,

$$l_{\text{в}} = D_{\text{к}} + d_2, \quad (2.45)$$

где  $d_2$  – радиальный размер канала.

Расстояние между наружными стенками устьев канала на уровне оси стержня магнитопровода печного трансформатора определяют по выражению, м,

$$l'_{\text{в}} = D_{\text{к}} + 2d_2, \quad (2.46)$$

Наиболее благоприятной с точки зрения уменьшения магнитных потоков рассеяния является прямоугольная или овальная форма поперечного сечения канала с большей стороной (осевой размер канала  $a_2$ ), расположенной параллельно оси индуктора (рис. 2.15, а, б).

Для получения наибольшего электрического коэффициента полезного действия  $\eta$ , и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  размер канала в радиальном направлении  $d_2$  выбирают в соответствии с неравенством

$$d_2 \leq (0,5 \dots 0,75) \Delta_2, \quad (2.47)$$

где  $\Delta_2$  – глубина проникновения тока в жидкий металл канала.

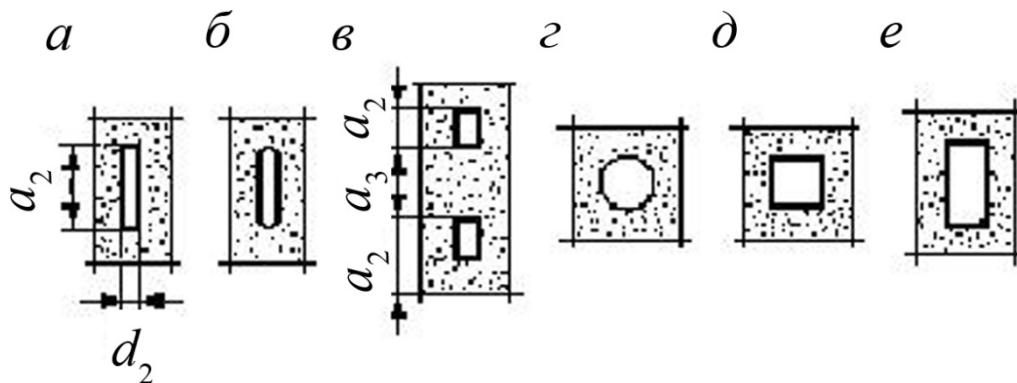


Рис. 2.15. Виды поперечных сечений каналов

Глубину проникновения тока  $\Delta_2$ , м, определяют по выражению, м,

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{2\rho_2}{\mu 2\pi f_2}}, \quad (2.48)$$

где  $\rho_2$  – удельное сопротивление расплавляемого металла или сплава в жидком состоянии, Ом·м;

$\mu$  – магнитная проницаемость расплавляемого металла или сплава в жидком состоянии, Гн/м,  $\mu = \mu_0 \mu_m$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$f_2$  – частота тока в жидком металле в канале,  $f_2 = f$ .

С ростом мощности увеличивают сечение канала, т. е. возрастает его осевой размер  $a_2$ , т. к. радиальный размер  $d_2$  ограничен ( $d_2 \leq 0,75\Delta_2$ ). Обычно  $a_2 = (1,5 \dots 5)d_2$  (для прямоугольного сечения).

При необходимости дальнейшего увеличения сечения вместо одного канала делают два или три параллельных канала. Такая конструкция обладает большей механической прочностью. Если по расчету получается  $a_2 > 5d_2$ , целесообразно принять два параллельных канала, разнесенных в осевом направлении на расстояние  $a_k = (1,5 \dots 2,5)a_2$  (см. рис. 2.15, в).

Связь между длиной индуктора (осевой размер индуктора  $a_{\text{и}}$ ) и осевым размером канала  $a_2$  приближенно устанавливают по величине коэффициента заполнения каналов [2], [13]

$$k_{3.к} = a_2 / a_{\text{и}}.$$

В зависимости от числа каналов, охватывающих индуктор, коэффициент  $k_{3.к}$  обычно лежит в пределах:

при одном канале 0,15–0,20 [2]; 0,20–0,40 [13];  
двух каналах 0,25–0,30 [2]; 0,30–0,50 [13];  
трех « 0,30–0,35 [2]; 0,35–0,60 [13].

Следует отметить, что чаще используют значения  $k_{3.к}$ , соответствующие нижним границам из диапазонов  $k_{3.к}$ . Коэффициенты заполнения каналов, близкие к нижнему пределу, берут при воздушном охлаждении индуктора, а близкие к верхнему пределу – при водяном охлаждении индуктора.

Наиболее благоприятной с электротехнической точки зрения формой канала в продольном сечении является кольцевая форма (рис. 2.16, а), повторяющая форму индуктора.

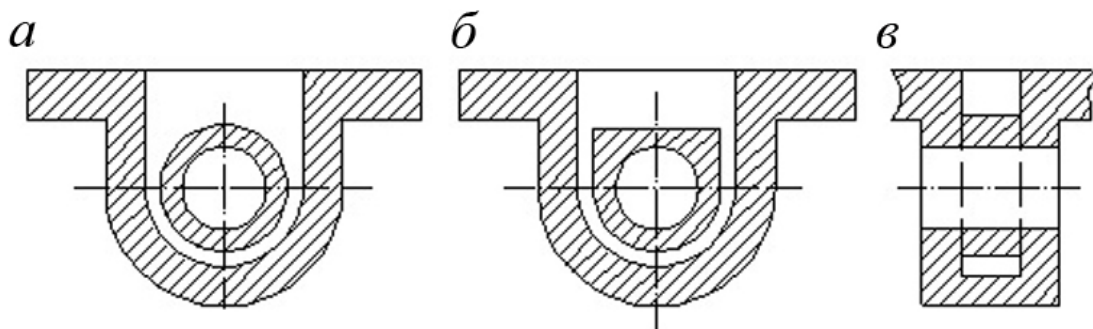


Рис. 2.16. Варианты исполнения верхней части подового камня

Иногда при выборе формы и размеров плавильных каналов используют в основном не электротехнические, а технологические условия. Например, в печах для плавки алюминия, а в отдельных случаях и цинка, каналы подвержены зарастанию. Для уменьшения зарастания и удобства чистки выбирают круглое, квадратное или прямоугольное сечения каналов (см. рис. 2.15, *г*, *д*, *е*) с радиальным размером  $d_2$ , значительно превышающим рекомендованный выражением (2.46). Обычно в этих печах  $d_2 \geq 0,1$  м и  $a_2 \approx 2d_2$ . Для удобства чистки в продольном сечении каналы этих печей выполняют из прямолинейных участков, хотя это может сопровождаться увеличением потоков рассеяния.

Ток в канале индукционной единицы находят исходя из предположения, что  $I_{\text{и}} N_{\text{и}} \approx I_{\text{к}} N_{\text{к}}$ . Как указывалось выше, число витков канала  $N_{\text{к}} = 1$ , поэтому ток в жидком металле в канале определяют по выражению, А,

$$I_{\text{к}} = I_{\text{и}} N_{\text{и}}.$$

Сечение канала определяют по выражению, м<sup>2</sup>,

$$S_{\text{к}} = \frac{I_{\text{к}}}{j_{\text{к}}}, \quad (2.49)$$

где  $j_{\text{к}}$  – плотность тока в канале, А/м<sup>2</sup>.

Для определения плотности тока в жидком металле в канале печи используют выражение, А/м<sup>2</sup>,

$$j_{\text{к}} = \sqrt{\frac{P_{\text{к.уд}}}{\rho_2}}, \quad (2.50)^*$$

где  $P_{\text{к.уд}}$  – удельная мощность в жидком металле, Вт/м<sup>3</sup>;

$\rho_2$  – удельное сопротивление расплавляемого металла или сплава в расплавленном состоянии, Ом·м.

---

\* Выражение (2.50) получено следующим образом:

$$I_{\text{к}} = j_{\text{к}} S_{\text{к}}; R_{\text{к}} = \rho_2 \frac{l_{\text{к}}}{S_{\text{к}}}; P_{\text{к}} = R_{\text{к}} I_{\text{к}}^2 \rightarrow P_{\text{к}} = \rho_2 \frac{l_{\text{к}}}{S_{\text{к}}} j_{\text{к}}^2 S_{\text{к}}^2 = \rho_2 l_{\text{к}} S_{\text{к}} j_{\text{к}}^2 = \rho_2 V_{\text{к}} j_{\text{к}}^2,$$

где  $P_{\text{к}}$  – активная мощность канала,  $V_{\text{к}}$  – объем канала;  $P_{\text{к.уд}} = \frac{P_{\text{к}}}{V_{\text{к}}} = \rho_2 \frac{V_{\text{к}}}{V_{\text{к}}} j_{\text{к}}^2 = \rho_2 j_{\text{к}}^2$ ;

$$j_{\text{к}} = \sqrt{\frac{P_{\text{к.уд}}}{\rho_2}}.$$

Для некоторых металлов и сплавов значения  $j_k$  и  $P_{к.уд}$  приведены в табл. 2.3 на с. 58. Эти значения (табл. 2.3) получены на основании большого опыта проектирования и эксплуатации индукционных канальных печей.

Осевой размер канала  $a_2$  (прямоугольное сечение канала), м, определяют по выражению

$$S_k = a_2 d_2. \quad (2.51)$$

Объем канала,  $m^3$ , определяют через передаваемую мощность в канал печи по выражению

$$V_k = \frac{P_k}{P_{к.уд}}. \quad (2.52)$$

Активную мощность, передаваемую в канал печи, получают исходя из энергетической диаграммы (рис. 2.17).

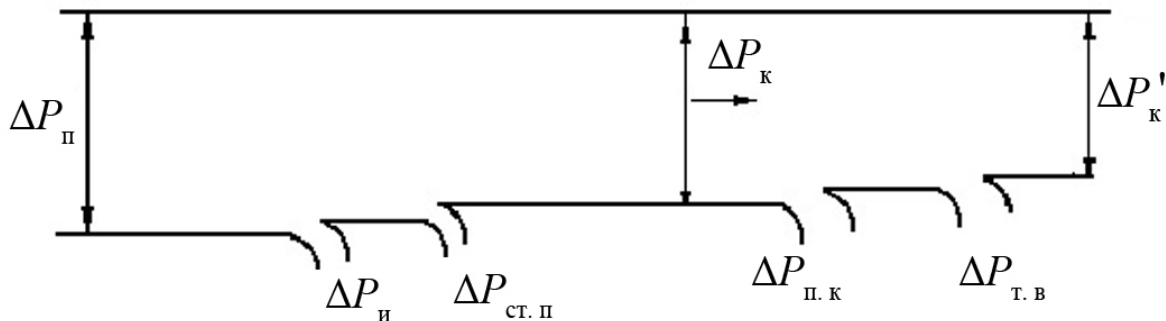


Рис. 2.17. Энергетическая диаграмма индукционной канальной печи

Мощность  $P_k$  отличается от мощности в жидком металле (в чистом виде)  $P'_k$  на значения величины тепловых потерь в ванне и подовом камне индукционной канальной печи.

$$P_k = P_{\Pi} - \Delta P_{\Pi} - \Delta P_{ст.П} - \Delta P_{п.к} - \Delta P_{т.в}, \quad (2.56)$$

где  $P_k$  — активная мощность в канале печи;

$P_{\Pi}$  — активная мощность печи;

$\Delta P_{\Pi}$  — электрические потери в меди индуктора;

$\Delta P_{ст.П}$  — электрические потери в стали печного трансформатора;

$\Delta P_{п.к}$  — тепловые потери в подовом камне печи;

$\Delta P_{т.в}$  — тепловые потери ванны печи.

Мощность потерь в меди индуктора, Вт, определяют по выражению

$$\Delta P_{\Pi} = R_1 I_{\Pi}^2, \quad (2.54)$$

где  $R_1$  — активное сопротивление меди индуктора.

Активное сопротивление меди индуктора, Ом, определяют по выражению

$$R_1 = \frac{1,15\rho_1 N_1 \pi D_{\text{и}}}{S'_M}, \quad (2.55)$$

где 1,15 – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение тока по сечению провода индуктора.

Мощность потерь в стали магнитопровода печного трансформатора определяют по выражению, Вт,

$$\Delta P_{\text{ст.п}} = p_c m_c, \quad (2.56)$$

где  $p_c$  – удельные потери в стали определенной марки при индукции, соответствующей значению индукции, принятой при расчете. Значение  $p_c$  определяют из справочной или специальной литературы, например, [19];

$m_c$  – масса стали.

Расчетное значение длины канала по средней линии определяют по выражению, м,

$$l_k = \frac{V_k}{S_k}, \quad (2.57)$$

где  $V_k$  – объем канала, рассчитанный по выражению (2.52);

$S_k$  – сечение канала, рассчитанное по выражению (2.49).

Минимальную длину канала, рассчитанную по эскизу (рис. 2.17) с учетом формулы (2.45), определяют по выражению, м,

$$l'_k = \pi l_b. \quad (2.58)$$

Полученные значения  $l_k$  и  $l'_k$  должны быть достаточно близкими, причем очевидно, что расхождение должно определяться неравенством  $l'_k < l_k$ . В противном случае необходимо проводить коррекцию расчета.

Толщина наружной части футеровки канала  $d_{\text{ф.н}}$  должна быть больше толщины футеровки между каналом и проемом подового камня  $d_{\text{ф}}$ . По рекомендациям [2], [5], [6], [13]  $d_{\text{ф.н}} = 0,1 \dots 0,25$  м.

Диаметр наружной части подового камня на уровне горизонтальной оси стержня магнитопровода определяют по выражению, м,

$$D_{\text{ф}} = l'_b + 2d_{\text{ф.н}}. \quad (2.59)$$

Для размещения подового камня в «окне» магнитопровода проводят оценку соотношения размеров подового камня и «окна» магнитопровода с использованием эскиза (рис. 2.18).

Массу жидкого металла в канальной части индукционной единицы рассчитывают с использованием размеров эскиза индукционной единицы.

Массу металла в канале определяют по выражению, кг,

$$m_{\text{м.к}} = \gamma_{\text{м.ж}} V_{\text{к.и}}. \quad (2.60)$$

Массу металла в ванне печи определяют по выражению, кг,

$$m_{\text{м.в}} = G - m_{\text{м.к}}. \quad (2.61)$$

Объем ванны печи, занятой жидким металлом, определяют по выражению, м<sup>3</sup>,

$$V_{\text{в.п}} = \frac{m_{\text{м.в}}}{\gamma_{\text{ж.м}}}. \quad (2.62)$$

Высоту жидкого металла в ванне печи определяют по выражению, м<sup>2</sup>,

$$h_{\text{м.в}} = \frac{V_{\text{в.п}} \cdot 4}{\pi (D_{\text{в}})^2}. \quad (2.63)$$

Диаметр ванны печи принимают большим, чем осевой размер индуктора.

Высоту несливаемой части жидкого металла в ванне печи определяют по выражению, м,

$$h'_{\text{м.в}} = \frac{V'_{\text{в.п}} \cdot 4}{\pi (D_{\text{в}})^2}, \quad (2.64)$$

где  $V'_{\text{м.в}}$  – объем несливаемой части жидкого металла в ванне печи.

Как указывалось ранее, направление электродинамических сил совпадает с направлением потока энергии – от индуктора в канал, причем создаваемое этими силами давление равно нулю на обращенной к индуктору поверхности канала и имеет максимальное значение на противоположной (наружной поверхности) стороне. Максимальная величина давления почти не зависит от формы канала. Величину давления, создаваемого электродинамическими силами и сжимающего металл в закрытых каналах, определяют по выражениям:

$$F_{\text{сж}} = 0,5\mu \left( \frac{I_{\text{к}}}{a_2} \right)^2 \text{ Н/м}^2,$$

$$F_{\text{сж}} = 0,050\,985\mu \left( \frac{I_{\text{к}}}{a_2} \right)^2 \text{ кг/м}^2,$$

$$F_{\text{сж}} = 0,050\,985 \cdot 10^{-4} \mu \left( \frac{I_{\text{к}}}{a_2} \right)^2 \text{ кг/см}^2,^*$$

$$\text{или } F_{\text{сж}} = 0,050\,985 \cdot 10^{-4} \mu \left( \frac{I_{\text{к}}}{a_2} \right)^2 \text{ атм.} \quad (2.65)$$

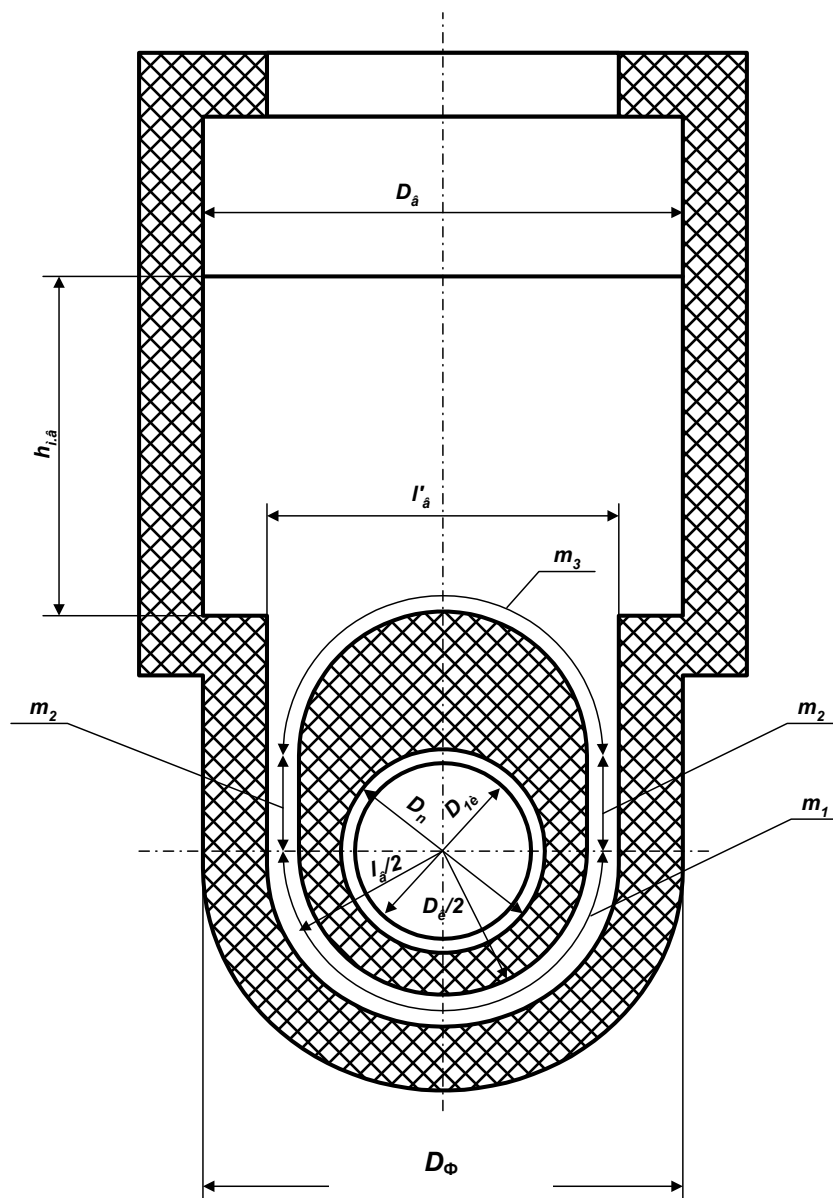


Рис. 2.18. Эскиз канальной части индукционной печи

Силами, противодействующими электродинамическому сжатию в закрытых каналах, являются гидростатическое давление металла в канале и атмосферное давление на поверхность зеркала металла в ванне.

\*  $1 \text{ кг/см}^2 = 1 \text{ атм.}$

Возможность пережата металла в канале будет исключена, если противодействующие силы создают давление большее, чем давление, созданное электродинамическими силами.

#### ПРИМЕР 4

Этот пример является продолжением задач, изложенных в примерах 1–3.

Рассчитать геометрические размеры канальной части индукционной канальной печи. В качестве исходных данных принять исходные данные и результаты расчетов примеров 1–3.

1. Проём подового камня определяют по формуле (2.43). При расчете принимают расстояние от наружной поверхности индуктора до внутренней поверхности проёма подового камня  $d_b = 0,015$  м.

$$D_n = D_{ли} + 2d_b = 0,2605 + 2 \cdot 0,015 = 0,2905 \text{ м.}$$

2. Внутренний диаметр канала индукционной единицы на уровне оси стержня магнитопровода печного трансформатора определяют по уравнению (2.44). При расчете принимают толщину футеровки  $d_\phi = 0,05$  м.

$$D_k = D_n + 2d_\phi = 0,2905 + 2 \cdot 0,05 = 0,3905 \text{ м.}$$

Оценим правомерность выбранных  $d_b$  и  $d_\phi$ .  $\frac{D_{ли}}{D_k} = \frac{0,2605}{0,3905} = 0,6671$ , что соответствует рекомендациям [2].

3. Глубину проникновения тока в жидкий металл канала определяют по выражению (2.48). Для расчета принимают величину удельного сопротивления сплава Л63 в жидком состоянии  $\rho_2 = 40 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (табл. 2.8).

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{2\rho_2}{\mu 2\pi f_2}} = \sqrt{\frac{40 \cdot 10^{-8}}{4\pi \cdot 10^{-7} \pi \cdot 50}} = 0,045 \text{ м.}$$

4. Радиальный размер канала индукционной единицы определяют по формуле (2.47)

$$d_2 \leq (0,5 \dots 0,75) \Delta_2; d_2 = 0,5 \Delta_2 = 0,5 \cdot 0,045 = 0,0225 \text{ м.}$$

Принимаем  $d_2 = 0,022$  м.

В аналогичных индукционных канальных печах применяют каналы сечением  $0,022 \times 0,09 \text{ м}^2$ .



Таблица 2.8

Удельное сопротивление некоторых  
металлов и сплавов в жидком состоянии

Металл или сплав	Химический состав, %	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·м
Латунь	30–33 Zn; остальное Cu	$38,5 \cdot 10^{-8}$
Латунь	39,5–36,6 Zn; остальное Cu	$40 \cdot 10^{-8}$
Бронза	10 Zn; 90 Cu	$28 \cdot 10^{-8}$
Медноникелевые сплавы	80 Zn; 20 Ni	$55 \cdot 10^{-8}$
Медь марки М0	100 Cu	$21,0 \cdot 10^{-8}$
Алюминий марки А0	100 Al	$24 \cdot 10^{-8}$
Марганцовистая	Cu 58; Zn 40; Sn 2	$42 \cdot 10^{-8}$
Фосфористая бронза марки БрОФ2-0,25	Cu 93; Zn 3; Sn 4	$35 \cdot 10^{-8}$
Никель	Ni 100	$(108...109) \cdot 10^{-8}$
Цинк	Zn 100	$(33,4...36,4) \cdot 10^{-8}$

5. Расстояние между устьями канала по средней линии на уровне горизонтальной оси стержня магнитопровода печного трансформатора определяют по формуле (2.45)

$$l_b = D_k + d_2 = 0,3905 + 0,022 = 0,4125 \text{ м.}$$

6. Расстояние между наружными стенками устьев канала на уровне горизонтальной оси стержня магнитопровода печного трансформатора определяют по выражению

$$l'_b = D_k + 2d_2 = 0,3905 + 2 \cdot 0,022 = 0,4345 \text{ м.}$$

7. Ток в канале индукционной единицы составляет

$$I_k = I_{и} N_{и} = 866,67 \cdot 43 = 37\,266,81 \text{ А.}$$

8. Плотность тока в жидком металле в канале печи по выражению (2.50)

$$j_k = \sqrt{\frac{P_{к,уд}}{\rho_2}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 10^6}{40 \cdot 10^{-8}}} = 11,18 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

По табл. 2.3. принято значение удельной мощности в канале печи  $P_{к,уд} = 50 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^3$ .

По данным со с. 58 плотность тока в жидком металле в канале печи при плавке латуни составляет  $10 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ . Рассчитанное значение близко к рекомендуемому.

9. Сечение канала по формуле (2.49) составит

$$S_k = \frac{I_k}{j_k} = \frac{37\,266,81}{11,18 \cdot 10^6} = 0,003\,333 \text{ м}^2.$$

10. Осовой размер канала индукционной единицы определяют по уравнению (2.51)

$$a_2 = \frac{S_k}{d_2} = \frac{0,003\,333}{0,022} = 0,1515 \text{ м.}$$

Отношение осевого размера канала к радиальному

$$\frac{a_2}{d_2} = \frac{0,1515}{0,022} = 6,89.$$

Поскольку  $a_2 > 5d_2$ , целесообразно принять два параллельных канала, разнесенных в осевом направлении на расстояние

$$a_k = \frac{1,5a_2}{2} = \frac{1,5 \cdot 0,1515}{2} = 0,1136 \text{ м.}$$

Осовой размер каждого канала  $a'_2 = \frac{a_2}{2} = \frac{0,1515}{2} = 0,075\,75 \text{ м.}$

Отношение осевого размера канала к осевому размеру индуктора составит  $\frac{a_2}{a_{\text{и}}} = \frac{0,1515}{0,516} = 0,2936$ , что соответствует рекомендациям [2].

11. Активное сопротивление меди индуктора определяют по выражению (2.55)

$$R_1 = \frac{1,15\rho_1 N_1 \pi D_{\text{и}}}{S'_M} = \frac{1,15 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 43\pi \cdot 0,2485}{84 \cdot 10^{-6}} = 0,009\,19 \text{ Ом.}$$

12. Мощность потерь в меди индуктора по формуле (2.54)

$$\Delta P_{\text{и}} = R_1 I_{\text{и}}^2 = 0,919 \cdot 10^{-2} \cdot 866,67^2 = 6902,76 \text{ Вт.}$$

13. Мощность потерь в стали магнитопровода печного трансформатора определяют по выражению (2.56)

$$\Delta P_{\text{ст.п}} = p_c m_c = 1,2 \cdot 669,068 = 802,88 \text{ Вт.}$$

Значение удельных потерь в стали магнитопровода принято  $p_c = 1,2 \text{ Вт/кг.}$

14. Активную мощность, передаваемую в канал печи, определяют по уравнению (2.53)

$$P_k = P_{\text{п}} - \Delta P_{\text{п}} - \Delta P_{\text{ст.п}} = 247 - 6,903 - 0,803 = 239,294 \text{ кВт.}$$

15. Объем двух каналов печи определяют по формуле (2.52)

$$V_k = \frac{P_k}{P_{k.уд}} = \frac{239\,294}{50 \cdot 10^6} = 0,004\,786 \text{ м}^3.$$

16. Длину канала по средней линии определяют по формуле (2.57)

$$l_k = \frac{V_k}{S_k} = \frac{0,004\,786}{0,003\,333} = 1,4359 \text{ м.}$$

17. Минимальную длину канала определяют по уравнению (2.58)

$$l'_k = \pi l_b = \pi \cdot 0,4125 = 1,2959 \text{ м.}$$

18. Размеры отдельных участков канала печи определяют с использованием эскиза печи (рис. 2.18).

Длина участка составит  $m_1 = \frac{l'_k}{2} = \frac{1,2959}{2} = 0,64795 \text{ м}$ , длина участка  $m_2 = 0,05 \text{ м}$ , длина участка  $m_3 = 0,687\,95 \text{ м}$ .

Полная длина канала по средней линии составит

$$l_k = m_1 + 2m_2 + m_3 = 0,647\,95 + 2 \cdot 0,05 + 0,687\,95 = 1,4359 \text{ м.}$$

19. Диаметр наружной части подового камня на уровне горизонтальной оси стержня магнитопровода определяют по формуле (2.59)

$$D_\phi = l'_b + 2d_{\phi.н} = 0,4345 + 2 \cdot 0,1 = 0,6345 \text{ м.}$$

С учетом неравенства  $d_{\phi.н} > d_\phi$  принимаем  $d_{\phi.н} = 0,1 \text{ м}$ .

20. Оценку соотношения размеров подового камня и «окна» магнитопровода проводят для размещения подового камня в «окне» магнитопровода. Используя результаты расчета длин отдельных участков магнитопровода (пример 3), определяют расстояние между участками  $l_{c2}$  и  $l_{ст}$

$$l = l_{c3} - 2\sqrt{S_c} = 0,8592 - 2 \cdot \sqrt{0,032\,86} = 0,496\,65 \text{ м.}$$

Расстояние от горизонтальной оси стержня магнитопровода до наружной стенки подового камня по вертикальной оси

$$l' = \frac{D_\phi}{2} = \frac{0,6345}{2} = 0,317\,25 \text{ м.}$$

Длина части подового камня, размещенная в «окне» магнитопровода, составляет

$$l'' = l' - \frac{\sqrt{S_c}}{2} = 0,317\,25 - \frac{\sqrt{0,032\,86}}{2} = 0,2266 \text{ м.}$$

Расчеты показывают, что  $l > l''$ . Подовый камень может быть размещен в «окне» магнитопровода.

21. Массу металла в канальной части печи определяют с использованием эскиза печи (рис. 2.18) по выражению (2.60)

$$m_{\text{м.к}} = \gamma_{\text{м.ж}} V_{\text{к.и}} = \gamma_{\text{м.ж}} a_2 \left[ \left( 2m_2 + \frac{\pi l_{\text{в}}}{2} \right) d_2 + \Delta_2 m_3 \right] =$$

$$= 8000 \cdot 0,1515 \cdot \left[ \left( 2 \cdot 0,05 + \frac{\pi \cdot 0,4125}{2} \right) \cdot 0,022 + 0,045 \cdot 0,68795 \right] =$$

$$= 57,44 \text{ кг.}$$

22. Масса металла в ванне печи по уравнению (2.61) равна

$$m_{\text{м.в}} = G - m_{\text{м.к}} = 1300 - 57,44 = 1242,56 \text{ кг.}$$

23. Объем ванны печи, занятой жидким металлом, определяют по формуле (2.62)

$$V_{\text{в.п}} = \frac{m_{\text{м.в}}}{\gamma_{\text{ж.м}}} = \frac{1242,56}{8000} = 0,15532 \text{ м}^3.$$

24. Высоту жидкого металла в ванне печи определяют по формуле (2.61)

$$h_{\text{м.в}} = \frac{V_{\text{в.п}} \cdot 4}{\pi (D_{\text{в}})^2} = \frac{0,15532 \cdot 4}{\pi \cdot 0,64^2} = 0,483 \text{ м.}$$

Диаметр ванны печи  $D = 0,64$  м принят исходя из эскиза печи (рис. 2.18).

25. Высоту несливаемой части жидкого металла в ванне печи определяют по уравнению (2.64)

$$h'_{\text{м.в}} = \frac{V'_{\text{в.п}} \cdot 4}{\pi (D_{\text{в}})^2} = \frac{0,03033 \cdot 4}{\pi \cdot (0,64)^2} = 0,0943 \text{ м.}$$

Масса несливаемой части жидкого металла в ванне печи

$$m'_{\text{м.в}} = G_{\text{б}} - m_{\text{м.к}} = 300 - 57,33 = 242,67 \text{ кг.}$$

Объем несливаемой части жидкого металла

$$V'_{\text{в}} = \frac{242,67}{8000} = 0,03033 \text{ м}^3.$$

26. Давление, создаваемое электродинамическими силами (радиальные) в канале печи, определяют по формуле (2.65)

$$F_{\text{сж}} = 0,050\,985 \cdot 10^{-4} \mu \left( \frac{I_k}{a_2} \right)^2 = 0,050\,985 \cdot 4\pi \cdot 10^{-11} \cdot \left( \frac{37\,266,81}{0,1515} \right)^2 =$$

$$= 0,387\,67 \text{ атм.}$$

Полученное значение меньше атмосферного давления, поэтому нет необходимости увеличения высоты жидкого металла в ванне печи.

#### **2.4.5. Расчет электрических параметров индукционной канальной печи. Определение мощности конденсаторной батареи, необходимой для повышения коэффициента мощности печи**

В зависимости от конструкции канальной части реактивное сопротивление расплавленного металла или сплава в канале и ванне печи определяют по выражениям, Ом,

$$\text{при } d_2 < \Delta_2 \quad R_2 = \rho_2 \left[ l_d / (a_2 d_2) + l_\Delta / (a_2 \Delta_2) \right], \quad (2.66)$$

$$\text{при } d_2 > \Delta_2 \quad R_2 = \rho_2 \left[ (l_d + l_\Delta) / (a_2 \Delta_2) \right], \quad (2.67)$$

где  $l_d$  – длина (по средней линии) пути тока канальной части, ограниченной стенками канала, м;

$l_\Delta$  – то же, не ограниченной стенками канала.

На этом участке сечение канальной части определяют как произведение осевого размера канала и глубины проникновения тока канала в расплавленный металл или сплав, т. е. предполагают, что радиальный размер канала  $d_2 = \Delta_2$ , м.

Активное сопротивление канала можно определить

$$R_2 = \rho_2 l_2 k_{\text{п.э}} / S_k, \quad (2.68)$$

где  $\rho_2$  – удельное сопротивление жидкого металла, Ом·м;

$l_2$  – активная длина канала, м;

$k_{\text{п.э}}$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение переменного тока по сечению канала.

$$\rho = \sqrt{8\pi f S_k / 10^{11} \rho_2}.$$

Для каналов овального или прямоугольного сечений с отношением сторон более 3 : 1  $k_{\text{п.э}}$  определяют из графика рис. 2.19 а, б по аргументу

$$d_2 / \Delta_2 = 2 \cdot 10^{-5} b_2 \sqrt{f / \rho_2},$$

где  $d_2$  – ширина канала, м.

Приведенное сопротивление расплавленного металла или сплава в канале рассчитывают аналогично приведенному сопротивлению вторичной обмотки трансформатора.

Коэффициент  $k_{п.э}$  зависит от размеров сечения канала, от частоты тока и удельного сопротивления металла. Для каналов круглого, овального и прямоугольного сечений с отношением сторон не более 3 : 1  $k_{п.э}$  определяют из графиков рис. 2.19, а по аргументу, Ом,

$$R'_2 = N_{и}^2 R_2. \quad (2.69)$$

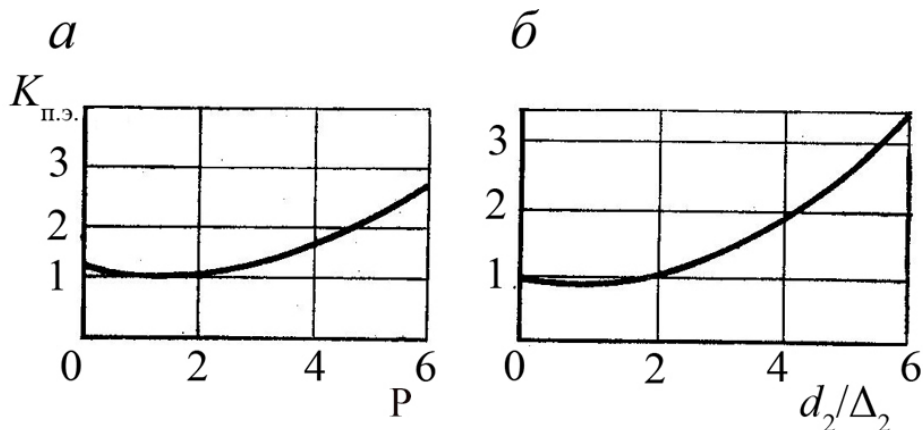


Рис. 2.19. Графики для определения поправочного коэффициента  $k_{п.э}$  от удельного сопротивления металла (а) и отношения  $d_2/\Delta_2$  (б)

Активное сопротивление нагруженного индуктора определяют по выражению, Ом,

$$R_{и} = R_1 + R'_2, \quad (2.70)$$

где  $R_1$  – активное сопротивление меди индуктора, рассчитанное по выражению (2.55).

Индуктивное сопротивление нагруженного индуктора определяют по расчетно-эмпирической формуле, Ом,

$$X_{и} = \frac{8\pi f N_{и}^2 D_p d_s k_r k_s 10^{-6}}{a_{и}}, \quad (2.71)$$

где  $D_p$  – средний (расчетный) диаметр зазора;

$d_s$  – приведенное расстояние между индуктором и каналом;

$k_r$  – коэффициент Роговского, учитывающий конечную длину системы индуктор–канал;

$k_s$  – коэффициент, учитывающий увеличение индуктивного сопротивления вследствие различия осевых размеров индуктора  $a_{\text{и}}$  и канала  $a_2$ .

Индуктивное сопротивление системы индуктор–канал возрастает с уменьшением отношения ее поперечного сечения к ее длине. Индуктивность системы тем больше, чем больше поток рассеяния, который растет с увеличением площади пространства между индуктором и каналом, что и учитывают в выражении (2.70) произведением  $\pi D_p d_s$ .

Средний (расчетный) диаметр зазора определяют по выражению, м,

$$D_p = (l_{\text{в}} + D_{\text{ли}}) / 2, \quad (2.72)$$

где  $l_{\text{в}}$  – расстояние между устьями канала по средней линии на уровне оси стержня магнитопровода по формуле (2.45);

$D_{\text{ли}}$  – наружный диаметр индуктора по уравнению (2.35).

Приведенное расстояние между индуктором и каналом определяют по выражению, м,

$$d_s = (l_{\text{в}} - D_{\text{ли}}) / 2 + (d_1 + d_2) / 3, \quad (2.73)$$

где  $d_1$  – радиальный размер индуктора;

$d_2$  – радиальный размер канала.

Индуктор, к которому приводят сопротивление системы индуктор – канал, представляет собой соленоид. Индуктивность соленоида обратно пропорциональна его высоте, т. е. его осевому размеру  $a_{\text{и}}$ . Конечную длину системы индуктор–канал учитывают с помощью коэффициента Роговского, который рассчитывают по выражению

$$k_r = 1 - \frac{(l_{\text{в}} - D_{\text{ли}} + 2d_1 + 2d_2)}{2\pi a_{\text{и}}}. \quad (2.77)$$

Поток рассеяния увеличивают с повышением отношения осевых размеров индуктора  $a_{\text{и}}$  и канала  $a_2$ . Это учитывают в выражении (2.71) при помощи коэффициента  $k_s$ , который определяют по выражению

$$k_s = 1 + \frac{\alpha(1 + \alpha a_{\text{и}} / d_s)}{3,5}, \quad (2.75)$$

где  $\alpha = (a_{\text{и}} - a_2) / a_{\text{и}}$ .

Полное сопротивление нагруженного индуктора определяют по выражению, Ом,

$$Z_{\text{и}} = R_{\text{и}} + jX_{\text{и}} = Z_{\text{и}} e^{j\varphi_{\text{и}}}, \quad (2.76)$$

где  $Z_{\text{и}} = \sqrt{R_{\text{и}}^2 + X_{\text{и}}^2}$ ;

$$\varphi_{\text{и}} = \arctg \frac{X_{\text{и}}}{R_{\text{и}}}.$$

Коэффициент мощности печи определяют по выражению

$$\cos \varphi_{\text{и}} = \cos \left( \arctg \frac{X_{\text{и}}}{R_{\text{и}}} \right). \quad (2.74)$$

Ток индуктора определяют по выражению, А,

$$I_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{Z_{\text{и}}}. \quad (2.78)$$

Полную мощность индуктора определяют по выражению, В·А,

$$S_{\text{и}} = U_{\text{и}} I_{\text{и}}. \quad (2.79)$$

Активную мощность индуктора определяют по выражению, Вт,

$$P_{\text{и}} = S_{\text{и}} \cos \varphi_{\text{и}}. \quad (2.80)$$

После проведения расчетов  $R_{\text{и}}$ ,  $X_{\text{и}}$ ,  $Z_{\text{и}}$ ,  $I_{\text{и}}$ ,  $P_{\text{и}}$ ,  $S_{\text{и}}$  по формулам (2.66)–(2.80) необходимо сравнить полученные результаты с принятыми и рассчитанными ранее значениями этих величин (примеры 1–4).

После первого цикла расчетов необходимо провести коррекцию, т. к. в начале расчета многие характеристики и коэффициенты задают исходя из рекомендаций, полученных на основании опыта проектирования и расчета индукционных канальных печей. Коррекция результатов расчета может быть связана с изменением числа витков и размеров индуктора, размеров магнитопровода и канальной части индукционной единицы.

Как правило, индукционные канальные печи оснащают батареями косинусных конденсаторов, необходимых для повышения коэффициента мощности до заданного значения. Обычно коэффициент мощности индукционной канальной печи с учетом компенсации равен  $\cos \varphi = 0,95$ .

Мощность конденсаторной батареи, необходимой для повышения коэффициента мощности до заданной величины, определяют по выражению, квар,



$$Q_c = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (2.81)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_1$  соответствует рассчитанному значению коэффициента мощности индукционной канальной печи;

$\operatorname{tg}\varphi_2$  соответствует заданному коэффициенту мощности.

После определения  $Q_c$ , используя справочную литературу, подбирают соответствующий конденсатор [20].

Электрический КПД рассчитывают по выражению

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{и}} - \Sigma P_{\text{и,ст}}}{P_{\text{и}}}, \quad (2.82)$$

где  $\Sigma P_{\text{и,ст}}$  – суммарная мощность потерь в меди индуктора и стали магнитопровода,  $\Sigma P_{\text{и,ст}} = \Delta P_{\text{и}} + \Delta P_{\text{с}}$ .

Тепловой КПД печи определяют по выражению

$$\eta_{\text{т}} = \frac{\eta}{\eta_{\text{э}}} = \frac{0,8}{0,966} = 0,828. \quad (2.83)$$

Более точно тепловой коэффициент полезного действия печи может быть получен на основании теплового расчета. Если по тепловому расчету значение  $\eta_{\text{т}}$  окажется ниже значения  $\eta_{\text{э}}$ , определенного по выражению (2.82), то это означает, что реальная производительность печи будет ниже рассчитанной.

## ПРИМЕР 5

Этот пример является продолжением задач, изложенных в примерах 1–4.

Рассчитать электрические параметры индукционной канальной печи. Определить ток, мощность, электрический и тепловой КПД печи. Определить мощность конденсаторной батареи, необходимой для повышения коэффициента мощности печи.

В качестве исходных данных принять исходные данные и результаты расчетов примеров 1–4.

1. Активное сопротивление канальной части определяют по формуле (2.66) с использованием результатов расчета примера 4 и при учете того, что  $d_2 < \Delta_2$ ,

$$R_2 = \rho_2 \left[ l_d / (a_2 d_2) + l_{\Delta} / (a_2 \Delta_2) \right].$$

По эскизу (см. рис. 2.13 на с. 70) устанавливают

$$l_d = m_1 + 2m_2 = 0,644\,795 + 2 \cdot 0,05 = 0,744\,795 \text{ м};$$

$$l_{\Delta} = m_3 = 0,687\,95 \text{ м}.$$

$$R_2 = 40 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{0,744\,795}{0,1515 \cdot 0,022} + \frac{0,687\,95}{0,1515 \cdot 0,045} \right) = 1,297 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

2. Активное сопротивление нагруженного индуктора определяют по формуле (2.70)

$$R_{\text{и}} = R_1 + R'_2 = (0,919 + 23,98) \cdot 10^{-2} = 24,899 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Из примера 4 активное сопротивление меди индуктора составит

$$R_1 = 0,919 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Приведенное сопротивление жидкого металла или сплава в канальной части печи определяют по формуле (2.69)

$$R'_2 = N_{\text{и}}^2 R_2 = 43^2 \cdot 1,297 \cdot 10^{-4} = 23,98 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

3. Индуктивное сопротивление нагруженного индуктора определяют по уравнению (2.71)

$$X_{\text{и}} = \frac{8\pi f N_{\text{и}}^2 D_p d_s k_r k_s \cdot 10^{-6}}{a_{\text{и}}}.$$

Средний (расчетный) диаметр зазора рассчитывают по формуле (2.72)

$$D_p = (l_{\text{в}} + D_{1\text{и}})/2 = (0,4125 + 0,2605)/2 = 0,3365 \text{ м.}$$

Значения  $l_{\text{в}}$  и  $D_{1\text{и}}$  взяты из примера 4.

Приведенное расстояние между индуктором и каналом рассчитывают по уравнению (2.73)

$$\begin{aligned} d_s &= (l_{\text{в}} - D_{1\text{и}})/2 + (d_1 + d_2)/3 = \\ &= \frac{(0,4125 - 0,2605)}{2} + \frac{(0,015 + 0,022)}{3} = 0,088\,33 \text{ м.} \end{aligned}$$

Значения  $d_1$  и  $d_2$  взяты из примеров 3, 4.

Коэффициент Роговского определяют по выражению (2.74)

$$\begin{aligned} k_r &= 1 - \frac{(l_{\text{в}} - D_{1\text{и}} + 2d_1 + 2d_2)}{2\pi a_{\text{и}}}. \\ k_r &= 1 - \frac{(0,4125 - 0,2605 + 2 \cdot 0,015 + 2 \cdot 0,022)}{2\pi \cdot 0,516} = 0,9759. \end{aligned}$$

Значение  $a_{\text{и}}$  взято из примера 3.

Коэффициент  $k_s$  определяют по формуле (2.75)

$$k_s = 1 + \frac{\alpha(1 + \alpha a_{\text{и}}/d_s)}{3,5}.$$

$$\alpha = (a_{\text{и}} - a_2)/a_{\text{и}} = (0,516 - 0,1515)/0,516 = 0,706\,39.$$

$$k_s = 1 + \frac{0,706\,39 \cdot (1 + 0,706\,39 \cdot 0,516 / 0,088\,33)}{3,5} = 2,0346.$$

$$X_u = \frac{8\pi \cdot 50 \cdot 43^2 \cdot 0,3365 \cdot 0,088\,33 \cdot 0,9759 \cdot 1,8328 \cdot 10^{-6}}{0,516} =$$

$$= 0,239\,39 \text{ Ом} = 23,939 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

4. Полное сопротивление нагруженного индуктора определяют по выражению (2.76)

$$Z_{\text{и}} = R_{\text{и}} + jX_{\text{и}} = Z_{\text{и}} e^{j\varphi_{\text{и}}}.$$

$$Z_{\text{и}} = \sqrt{R_{\text{и}}^2 + X_{\text{и}}^2} = \sqrt{(23,98 \cdot 10^{-2})^2 + (23,939 \cdot 10^{-2})^2} = 33,88 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

$$\varphi_{\text{и}} = \arctg \frac{X_{\text{и}}}{R_{\text{и}}} = \arctg \frac{23,939 \cdot 10^{-2}}{23,98 \cdot 10^{-2}} = 44,95^\circ.$$

$$Z_{\text{и}} = 33,88 \cdot 10^{-2} e^{j44,95^\circ}.$$

5. Коэффициент мощности печи определяют по формуле (2.77)

$$\cos \left( \arctg \frac{X_{\text{и}}}{R_{\text{и}}} \right)_{\text{и}} = \cos \left( \arctg \frac{23,939 \cdot 10^{-2}}{23,98 \cdot 10^{-2}} \right) = 0,7077.$$

Следует отметить, что полученное значение  $\cos \varphi$  находится в пределах рекомендуемого значения  $\cos \varphi = 0,6\text{--}0,8$  (см. данные на с. 56).

Расхождение между принятым в начале расчета коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 0,75$  и полученным в результате расчета  $\cos \varphi_{\text{и}} = 0,7077$  составляет 5,73 %, что допустимо для инженерных расчетов.

6. Ток индуктора определяют по уравнению (2.78)

$$I_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{Z_{\text{и}}} = \frac{380}{33,88 \cdot 10^{-2}} = 1121,606 \text{ А}.$$

7. Полную мощность индуктора определяют по выражению (2.79)

$$S_{\text{и}} = U_{\text{и}} I_{\text{и}} = 426\,209,9 \text{ В} \cdot \text{А} = 426,210 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

8. Активную мощность индуктора определяют по уравнению (2.80)

$$P_{\text{и}} = S_{\text{и}} \cos \varphi_{\text{и}} = 426\,209,9 \cdot 0,7077 = 301\,628,74 \text{ Вт} = 301,63 \text{ кВт}.$$

Полученные значения тока и мощности превышают ранее рассчитанные значения тока и мощности (примеры 1, 3). Принятый в примере 1 электропечной трансформатор не сможет обеспечить соответствующее питание индукционной канальной печи.

Одним из способов снижения тока является изменение сопротивления канала за счет увеличения его длины, например, за счет увеличения участков  $m_2$  (см. рис. 2.18 со с. 82).

Принимаем для расчета  $m_2 = 0,15$  м, тогда  $ld = 0,647\,95 + 2 \cdot 0,15 = 0,947\,95$  м.

Активное сопротивление канала

$$R_2 = 40 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{0,947\,95}{0,1515 \cdot 0,22} + \frac{0,687\,95}{0,1515 \cdot 0,045} \right) = 0,5164 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Приведенное сопротивление канала составит

$$R'_2 = R_2 N_{\text{и}}^2 = 28,497 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление нагруженного индуктора

$$R_{\text{и}} = R_1 + R'_2 = (0,919 + 28,497) \cdot 10^{-2} = 29,416 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление нагруженного индуктора можно определить по выражению

$$Z_{\text{и}} = R_{\text{и}} + jX_{\text{и}} = Ze^{j\varphi_{\text{и}}}.$$

$$Z_{\text{и}} = \sqrt{R_{\text{и}}^2 + X_{\text{и}}^2} = \sqrt{(29,416 \cdot 10^{-2})^2 + (23,939 \cdot 10^{-2})^2} = 37,926 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

$$\varphi_{\text{и}} = \arctg \frac{X_{\text{и}}}{R_{\text{и}}} = \arctg \frac{23,939 \cdot 10^{-2}}{29,416 \cdot 10^{-2}} = 39,139^\circ.$$

Коэффициент мощности индуктора составит  $\cos \varphi_{\text{и}} = 0,7756$ .

Ток индуктора

$$I_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{Z_{\text{и}}} = \frac{380}{37,926 \cdot 10^{-2}} = 1001,95 \text{ А.}$$

Полная мощность индуктора

$$S_{\text{и}} = U_{\text{и}} I_{\text{и}} = 380 \cdot 1001,95 = 380\,741,44 \text{ В} \cdot \text{А} = 380,74 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Активная мощность индуктора

$$P_{\text{и}} = S_{\text{и}} \cos \varphi_{\text{и}} = 380,74 \cdot 0,7756 = 295,302 \text{ кВт.}$$

Полученное значение активной мощности не превышает 300 кВт, поэтому число индукционных единиц  $n$  и число фаз  $m$  остается таким же, как и в примере 1 ( $n = 1$ ,  $m = 1$ ). Активная мощность индуктора ( $P_{\text{и}} = 295,303$  кВт) превышает значение активной мощности, рассчитанной в примере 1 ( $P_{\text{и}} = 247$  кВт) с учетом производительности печи.

Поскольку количество тепла, необходимое для расплавления и доведения металла до температуры разливки массы сплава Л63  $G = 1,3$  т остается неизменным, постольку длительность нагрева

и подогрева жидкого металла  $\tau_1$  уменьшится, т. е. возрастет производительность печи.

Время нагрева и подогрева жидкого металла

$$\tau_1 = \frac{Q_m}{P_{\text{и}} \cdot 858,5 \eta_n} = \frac{152\,345,9}{858,5 \cdot 295,303 \cdot 0,8} = 0,751 \text{ ч.}$$

Число плавов в сутки составит

$$m_{\text{п}} = \frac{24}{\tau_1 + \tau_2} = \frac{24}{0,753 + 0,36} = 21,56.$$

Принимаем  $m_{\text{п}} = 21$ .

При увеличении  $P_{\text{и}}, j_{\text{м}}, \cos \varphi_{\text{и}}$  произойдет незначительное увеличение расчетного значения поперечного сечения магнитопровода печного трансформатора (см. расчет по формуле (2.24) со с. 61).

Для того чтобы избежать значительного конструктивного изменения индуктора и магнитопровода, достаточно перейти с четырехступенчатого сечения стержня магнитопровода на пятиступенчатое с  $k_{\text{ф}} = 0,95$  и уменьшить толщину стенки изолирующей гильзы в пределах допустимого с  $\delta_{\text{из.ст.м}} = 6 \text{ мм}$  на  $\delta_{\text{из.ст.м}} = 5 \text{ мм}$ . В этом случае внутренний диаметр индуктора не изменится.

9. Мощность и емкость конденсаторной батареи, необходимые для повышения коэффициента мощности до величины  $\cos \varphi = 0,95$ , определяют по выражению (2.81)

$$Q_{\text{с}} = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = 295,303 \cdot (0,8138 - 0,3287) = 143,251 \text{ квар},$$

$\operatorname{tg} \varphi_1$  соответствует коэффициенту мощности печи  $\cos \varphi = 0,7756$ ;

$\operatorname{tg} \varphi_2$  соответствует заданному коэффициенту мощности  $\cos \varphi = 0,95$ .

Выбирают [20] конденсатор косинусный КС2-0,38-50-2У3 с номинальным напряжением  $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ , номинальной мощностью  $Q_{\text{с ном}} = 50 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  и номинальной емкостью  $C_{\text{с ном}} = 1102 \text{ мкФ}$ .

Для того чтобы обеспечить повышение коэффициента мощности до величины  $\cos \varphi = 0,95$ , необходимо включить параллельно индуктору печи три конденсатора КС2-0,38-50-2У3. В этом случае

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{Q_{\text{с}}}{P} = 0,8138 - \frac{3 \cdot 50}{295,303} = 0,3058.$$

Коэффициент мощности печи с учетом компенсации  $\cos \varphi = 0,956$ .

Реактивный ток индуктора печи до компенсации составит

$$I_{p_n} = I_n \sin \varphi_n = 1001,95 \cdot 0,631 = 632,23 \text{ А.}$$

Реактивный ток печи после компенсации равен

$$I'_{p_n} = I_{p_n} - I_c = 632,44 - 394,737 = 237,703 \text{ А.}$$

Активная составляющая тока печи принимает значение

$$I_{a_n} = I_n \cos \varphi = 1001,95 \cdot 0,7756 = 777,11 \text{ А.}$$

Потребляемый ток печи с учетом компенсации составит

$$I = \sqrt{(I_{a_n})^2 + (I'_{p_n})^2} = \sqrt{777,11^2 + 237,703^2} = 812,65 \text{ А.}$$

Плотность тока в меди индуктора

$$j_{и} = \frac{I_{и}}{S_{м}} = \frac{1001,95}{84} = 11,93 \text{ А/мм}^2.$$

Ток в канале печи составит

$$I_k = I_{и} N = 1001,95 \cdot 43 = 43\,083,85 \text{ А.}$$

Плотность тока в канале печи

$$j_k = \frac{I_k}{S_k} = \frac{43\,083,85}{3333} = 12,926 \text{ А/мм}^2.$$

10. Электрический КПД печи определяют по выражению (2.82)

$$\eta_{э} = \frac{P_{и} - \Sigma P_{и,ст}}{P_{и}} = \frac{29\,5303 - 10\,028,76}{295\,303} = 0,966.$$

Суммарная мощность потерь в меди индуктора и в стали магнитопровода

$$\Sigma P_{и,ст} = \Delta P_{и} + \Delta P_c = 9\,225,86 + 802,88 = 10\,028,74 \text{ Вт,}$$

$\Delta P_c$  взято из примера 4.

Мощность потерь в меди индуктора

$$\Delta P_{и} = R_1 I_{и}^2 = 0,919 \cdot 10^{-2} \cdot 1001,95^2 = 9225,88 \text{ Вт.}$$

11. Тепловой КПД печи определяют по уравнению (2.83)

$$\eta_n = \frac{\eta}{\eta_{э}} = \frac{0,8}{0,966} = 0,828.$$

Основные результаты инженерного электрического расчета индукционной канальной печи для плавки латуни Л63 сведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Основные технические характеристики  
индукционной канальной печи

Характеристика	Единица измерения	Величина
Емкость:		
полезная	кг	1000
остаточная	кг	300
полная	кг	1300
Мощность печи:		
полная	кВ·А	380,74
активная	кВт	295,303
Электропечной трансформатор:		
полная номинальная мощность	кВ·А	400
первичное напряжение	кВ	6 или 10
вторичное напряжение	В	414–298
число фаз	—	1
Коэффициент мощности:		
без компенсации	—	0,7756
с компенсацией		0,956
Ток печи:		
без компенсации	А	1001,95
с компенсацией	А	812,65
КПД печи:		0,8
Электрический КПД	—	0,966
Тепловой КПД		0,828

### 3. ИНДУКЦИОННЫЕ ТИГЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

#### 3.1. Физические основы индукционного нагрева в тигельных печах

Индукционный нагрев может быть использован для нагрева практически любых материалов: сплавов металлов, проводников, диэлектриков, шлаков, газов и т. д. Его применение позволяет осу-

ществить передачу теплоты нагреваемому объекту без непосредственного контакта и обеспечить практически любые скорости нагрева при минимальных тепловых потерях в окружающую среду. Максимальный же уровень создаваемых температур при индукционном нагреве определяется в основном только стойкостью применяемых огнеупорных материалов.

Отсутствие необходимости непосредственного контакта между электрической цепью и нагреваемым материалом позволяет осуществлять нагрев в вакууме или защитной атмосфере. В то же время наличие относительно холодных шлаков, затрудняющих проведение рафинировочных процессов, сложное и дорогое электрооборудование, низкая стойкость футеровки при резких колебаниях температур между плавками, размывающее действие расплава при электродинамическом явлении перемешивания металла ограничивают сферу применения этого способа передачи энергии.

В основе индукционного нагрева лежит трансформаторный принцип передачи энергии индукцией от первичной электрической цепи ко вторичной. В таком случае электрическая энергия переменного тока подводится к первичной цепи индуктора, который представляет собой многовитковую катушку (соленоид), выполненную из медной профилированной водоохлаждаемой трубки, в результате чего вокруг него формируется переменное магнитное поле. Под его воздействием в нагреваемом теле, помещенном внутрь индуктора, как во вторичной обмотке трансформатора, наводится электрическое поле, линии напряженности которого располагаются в плоскости, перпендикулярной направлению линий магнитного потока индуктора, и имеют вихревой характер. Электродвижущая сила, индуцируемая в садке печи, пропорциональна скорости изменения магнитного потока,  $B$ ,

$$e = -\frac{d\Phi}{d\tau},$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, равный произведению магнитной индукции  $B$  на площадь сечения  $S$ , перпендикулярного силовым линиям поля, Вб;

$\tau$  – время, ч.

Под воздействием этого поля внутренние электрические заряды в расплавляемом теле приходят в движение, образуя



вихревые токи. Энергия электрического поля необратимо переходит в тепловую в соответствии с законом Джоуля–Ленца,  $\text{кДж/м}^3$ ,

$$q_v = \frac{E^2}{\rho},$$

где  $q_v$  – интенсивность объемного тепловыделения;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·м.

Нагрев используемых в качестве шихты ферромагнитных материалов до достижения температуры точки Кюри ( $740\text{--}770^\circ\text{C}$ ) осуществляется не только за счет вихревых токов проводимости, но и за счет потерь энергии на перемагничивание. После превышения уровня этой температуры нагреваемые проводники теряют свои магнитные свойства и работа индукционной печи становится аналогичной работе воздушного трансформатора (без сердечника). При этом индуцируемая в каждом витке ЭДС ( $e$ ) может быть определена по выражению, В,

$$e = a \Phi f \cdot 10^{-8},$$

где  $a$  – коэффициент формы кривой, по которой изменяется переменный ток, вызывающий появление и изменение магнитного поля;

$f$  – частота изменения поля, Гц.

Таким образом, величина ЭДС индукции пропорциональна частоте изменения магнитного потока во времени, а также величине магнитного потока, т. е. числу силовых линий, сцепленных с витком. Тепловая мощность, выделяемая вихревыми токами в толще нагреваемого тела, зависит от частоты переменного поля. Для эффективной работы тигельных индукционных печей их питание осуществляют электрическими токами повышенной или высокой частоты, что достигается установкой специальных генераторов, вырабатывающих ток требуемой частоты. Их применение снижает общий КПД установки.

Практически для индукционного нагрева используют следующие интервалы частот:

а)  $200\,000$  Гц и выше при нагреве стальных деталей диаметром меньше  $0,03$  м;

б)  $1000\text{--}10\,000$  Гц при нагреве стальных изделий диаметром  $0,03\text{--}0,15$  м и толщине закаливаемого слоя свыше  $2$  мм;

в) 50 Гц при термической обработке деталей свыше 0,15 м при нагреве на большую глубину;

г) для питания плавильных печей используют 50–10 000 Гц.

При частоте до 10 000 Гц применяют машинные генераторы, а свыше 10 000 Гц – электронно-ламповые.

Электромагнитное поле, создаваемое индуктором, образует цилиндрическую электромагнитную волну, которая, падая на боковую поверхность нагреваемого тела, обладает полной мощностью  $S$ , величина которой определяется вектором Умова–Пойнтинга:

$$\bar{S} = \frac{1}{2} [\bar{E} \times \bar{H}],$$

где  $\bar{E}$  – вектор напряженности электрического поля;

$\bar{H}$  – то же, магнитного поля.

Вектор полной потребляемой энергии является комплексной величиной, которая может быть разложена на две составляющие: величину потока активной энергии, выделяемой непосредственно в металле в виде тепла, и величину потока реактивной энергии переменного магнитного поля. Их значения могут быть найдены при решении дифференциальных уравнений электромагнитного поля (уравнения Максвелла) при соответствующих начальных и граничных условиях.

Относительно большое расстояние между индуктором и металлом в тигле (5–10 см) вызывает появление значительной реактивной мощности, что снижает электрический КПД установки до 0,03–0,1. Для снижения влияния этой составляющей мощности и обеспечения приемлемого КПД индукционные установки снабжают конденсаторными батареями. Наличие этих элементов значительно удорожает стоимость индукционной печи.

Относительная сложность установок индукционного нагрева (рис. 3.1) ограничивает их применение. Поэтому такие агрегаты целесообразно использовать для производства специальных сплавов, получение которых невозможно или экономически невыгодно в дуговых печах, а высокая стоимость получаемого металла позволяет компенсировать возрастающие затраты.

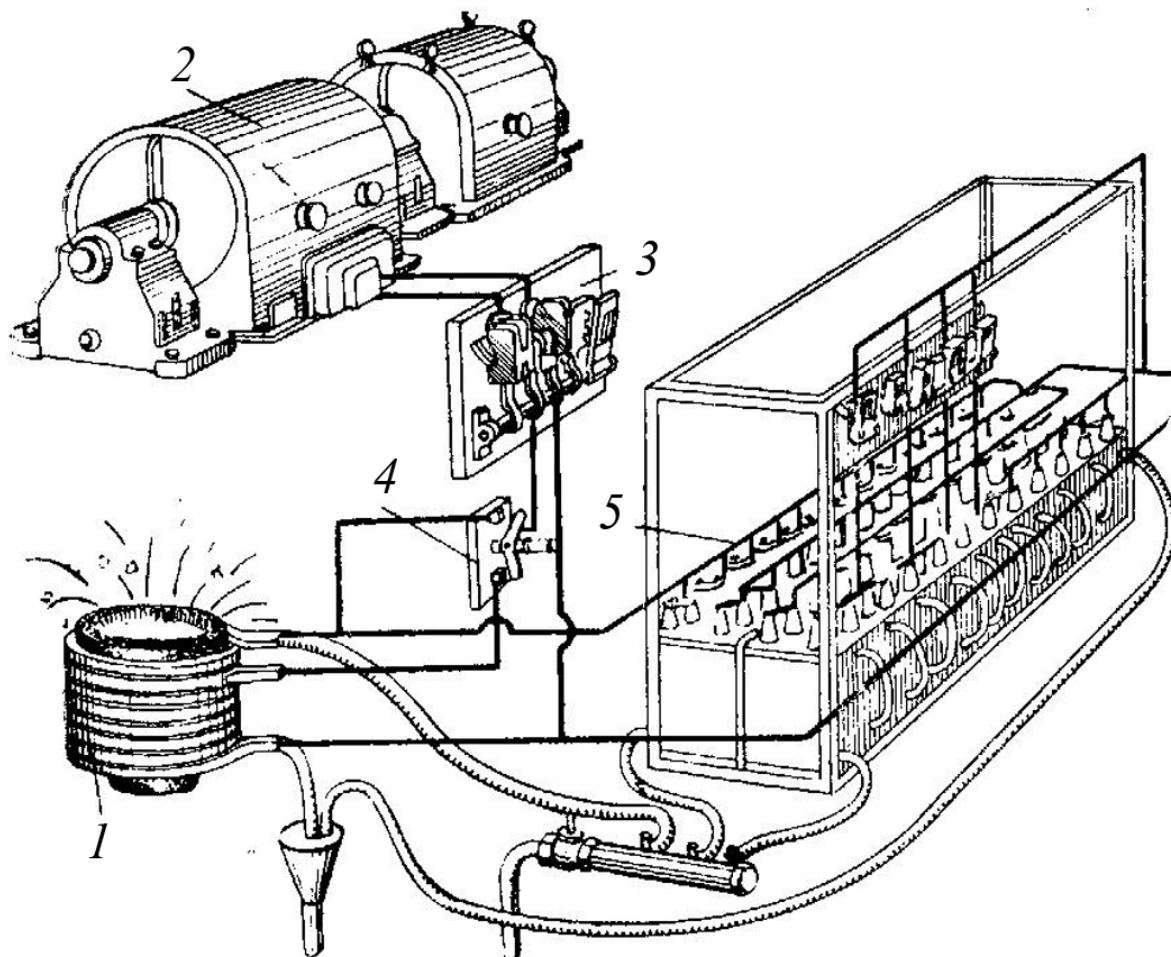


Рис. 3.1. Схема соединения основных элементов  
тигельной индукционной печи:

1 – индукционная печь; 2 – генератор; 3 – главный контактор;  
4 – переключатели числа витков; 5 – конденсаторная батарея с контакторами  
для подключения емкости в процессе плавки

Теоретически, а затем и экспериментально было показано, что минимально необходимая частота питающего тока зависит от диаметра садки  $d$  и удельного электрического сопротивления расплавленного металла  $\rho$ . Ее можно определить по выражению, Гц,

$$f \geq \frac{25 \cdot 10^8 \rho}{d^2}. \quad (3.1)$$

Токи высокой частоты, проходя через индуктор печи, обеспечивают в садке наведение ЭДС индукции в плоскостях, параллельных плоскости витков обмотки. При этом величина наведенных токов достигает максимального значения на внешней поверхности садки и значительно уменьшается к середине. При значительной толщине нагреваемого тела плотность индуцируемого

тока по мере удаления от поверхности к центру изменяется по экспоненциальному закону

$$\delta_x = \delta_0 e^{-\frac{x}{\Delta_3}},$$

где  $\delta_x$  – среднеквадратичное значение плотности тока на расстоянии  $X$  от поверхности проводника, А/м;

$\delta_0$  – то же, на поверхности проводника, А/м;

$e$  – основание натуральных логарифмов,  $e = 2,71$ ;

$\Delta_3$  – расстояние от поверхности проводника по направлению к центру, на котором плотность тока убывает в  $e = 2,71$  раза по сравнению с плотностью тока на поверхности. Это расстояние называют глубиной проникновения тока, м,

$$\Delta_3 = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}}, \quad (3.2)$$

где  $f$  – частота тока, Гц;

$\mu$  – магнитная проницаемость проводника.

Значение  $\Delta_3$  для различных металлов и сплавов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значение  $\Delta_3$  для различных металлов и сплавов  
при различной частоте  $f$

Металл или сплав	Частота, Гц									
	25		50		500		1000		10000	
	Твердый	Жидкий	Твердый	Жидкий	Твердый	Жидкий	Твердый	Жидкий	Твердый	Жидкий
Медь	1,32	4,48	1,0	3,34	0,29	1,1	0,21	0,75	0,067	0,23
Цинк	2,46	5,80	1,75	4,12	0,53	1,3	0,38	0,92	0,12	0,29
Латунь	2,50	6,40	1,77	4,53	0,56	1,4	0,4	1,0	0,12	0,3
Алюминий	1,7	5,2	1,2	3,68	0,38	1,16	0,27	0,82	0,085	0,26
Никель	3,3	10,5	2,34	7,44	0,74	2,35	0,52	1,67	0,16	0,53
Сталь	0,318	10,08	0,295	7,13	0,07	2,14	0,05	1,51	0,015	0,47

Для облегчения расчетов принимают, что в пределах  $\Delta_3$  выделяется практически вся тепловая энергия при прохождении

через нагреваемое тело электромагнитной волны. Эта же величина является показателем эффективности индукционного нагрева проводящего тела: если его поперечный размер превышает  $2\Delta_3$ , нагрев эффективен; если же он меньше  $\Delta_3$ , то нагрев неэффективен или невозможен.

Произведение силы тока в каждом витке индуктора  $I$  на их количество  $\omega$  называется *настилом тока*  $I\omega$ .

При нагреве твердых материалов их электрические параметры существенно изменяются. Для немагнитных материалов (диэлектрики) величина  $\mu = 1,0$  и не зависит от температуры. Глубина проникновения тока в них  $\Delta_3$  и величина полной выделяемой мощности  $S$  зависят в основном от значений  $\rho$  и  $s$  с увеличением температуры возрастают (рис. 3.2). Нагрев таких материалов происходит равномерно по всей глубине садки.

Для ферромагнитных материалов относительная магнитная проницаемость в пределах температур до точки Кюри ( $730\text{--}770^\circ\text{C}$ ) практически не изменяется (рис. 3.2, *a*). По достижении температуры точки Кюри значение магнитной проницаемости таких материалов резко возрастает до  $1,0$ . Характер изменения удельного сопротивления проводников остается идентичным изменению  $\rho$  для немагнитных материалов. С увеличением температуры значение  $\rho$  для проводников возрастает. В таком случае глубина проникновения тока при температуре точки Кюри также возрастает, и при нагреве закон изменения  $\Delta_3$  аналогичен закону для ферромагнитных материалов. Значение же полной энергии, выделяемой в нагреваемых материалах, резко падает при температурах выше точки Кюри.

При возникновении электрического тока в нагреваемых материалах токоведущие проводники в магнитном поле испытывают механические воздействия в виде сил, направление которых можно определить в любой момент времени по правилу левой руки. Под их воздействием в индукционной установке может происходить перемещение тел или их частей. При низко-температурном нагреве (до расплавления материалов) таковыми силами являются силы взаимодействия между токоведущими шинами, между витками индуктора и загрузкой, между кусками шихты и магнитным полем рассеивания. В жидком металле происходит взаимодействие расплавленного металла, по которому протекает индуцированный

ток, с магнитным полем индуктора. При этом происходит статическое обжатие всего расплава или его части, что приводит к выдавливанию металла из тигля с образованием выпуклого мениска на поверхности, а также динамическое воздействие, приводящее к циркуляции расплава в тигле.

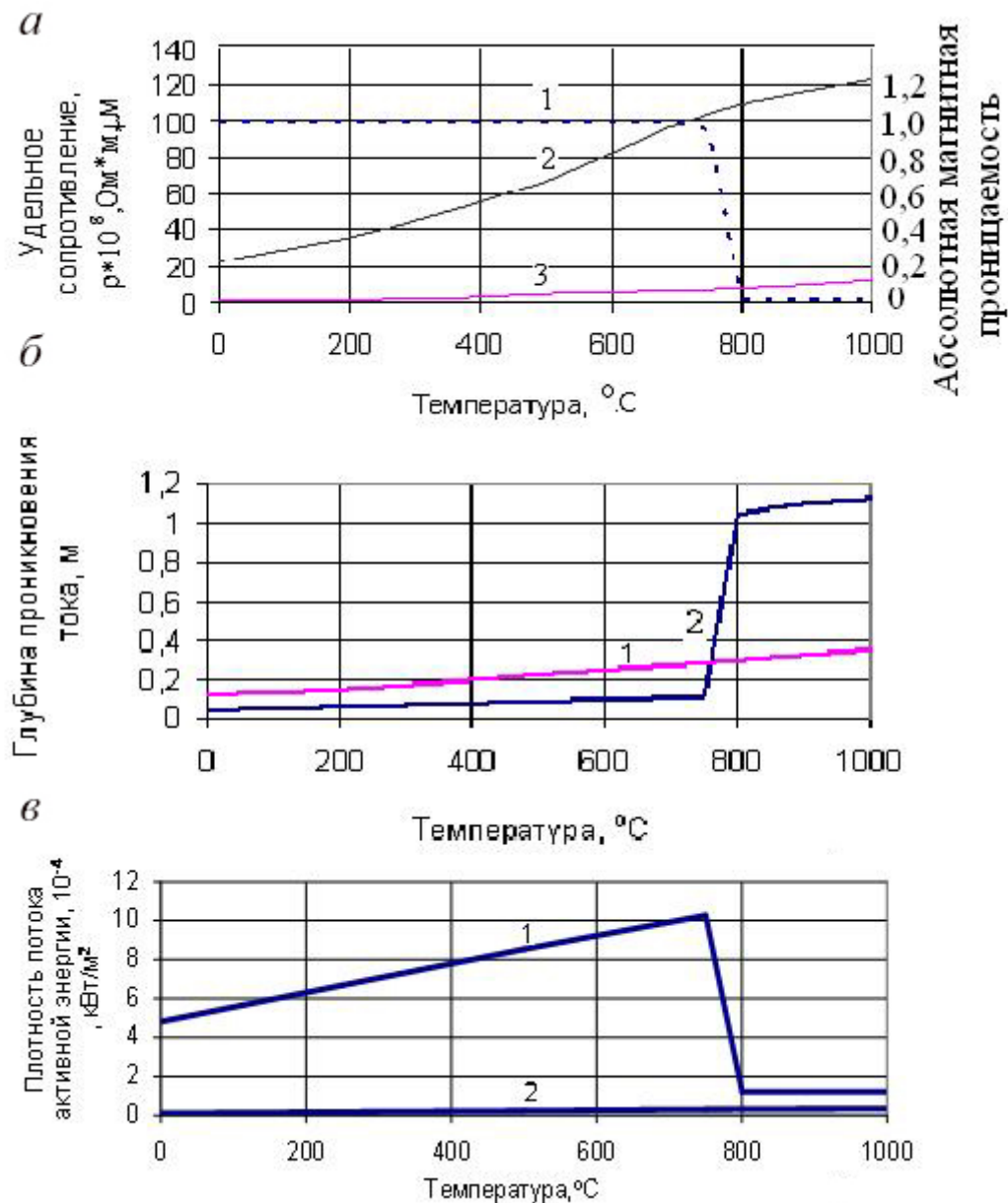


Рис. 3.2. Изменение удельного сопротивления  $\rho$  и абсолютной магнитной проницаемости среды  $\mu$  (а), глубины проникновения тока  $\Delta$ , (б) и потока активной энергии  $S_{\text{в}}$  (в) при температуре нагрева,  $f = 2500$  Гц и  $(I\omega) = 10^3$  А/м:

1 – ферромагнитный материал (сталь 20); 2 – немагнитный материал (медь);  
3 – абсолютная магнитная проницаемость среды

### 3.2. Конструкция индукционных тигельных печей

Современная индукционная тигельная печь (рис. 3.3) состоит из следующих основных конструктивных элементов: корпуса с ферромагнитным или электромагнитным экраном, индуктора с водяным охлаждением, изготовляемого из полый медной трубки, огнеупорной футеровки, вспомогательных устройств (механизм наклона печи, механизм поворота свода, контактное устройство).

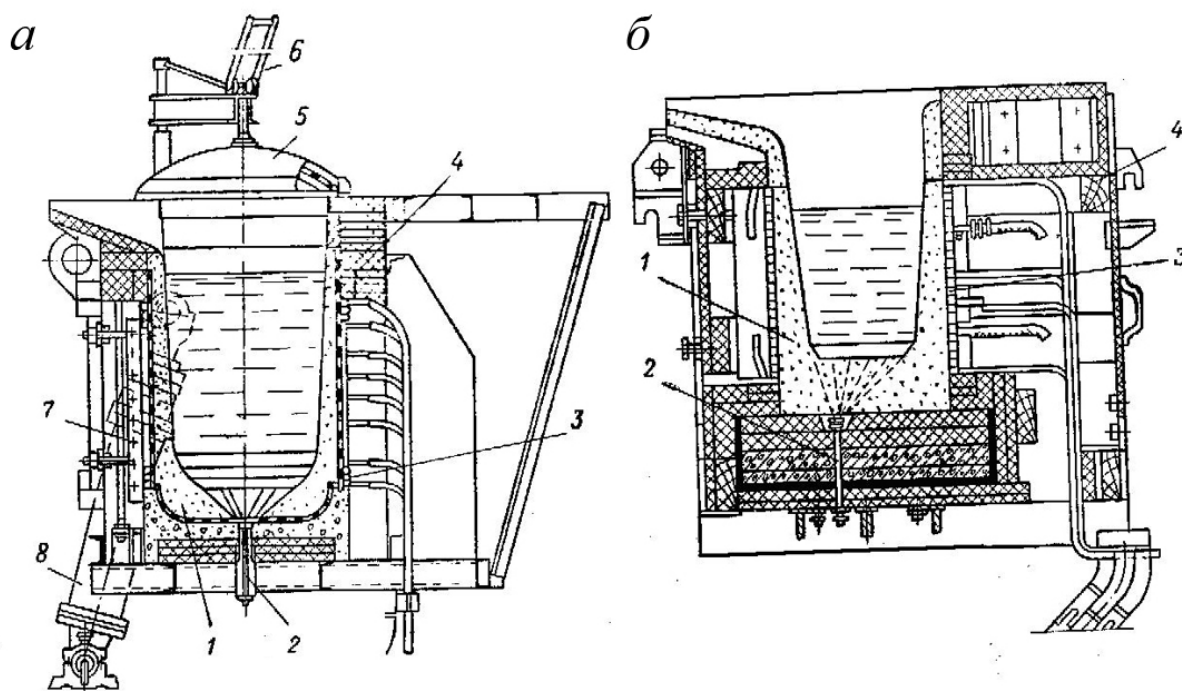


Рис. 3.3. Индукционная тигельная печь серии ИСТ  
(индукционная сталеплавильная тигельная):

*а* – большой емкости (свыше 1 т);

1 – футеровка; 2 – сигнализатор контроля состояния тигля; 3 – индуктор;

4 – корпус; 5 – свод; 6 – механизм подъема и поворота свода;

7 – внешний магнитопровод; 8 – механизм наклона печи;

*б* – средней емкости (до 1 т)

#### 3.2.1. Корпус

Основой индукционной печи, объединяющей отдельные ее элементы, является корпус. Его металлические части, находящиеся во внешнем магнитном поле индуктора, поглощают часть его активной мощности и нагреваются. Для снижения электрических потерь корпус печи изготовляют из немагнитных материалов. В печах малой мощности (до 1 т) используют дерево или асбоцемент, соединяемые при помощи немагнитных крепежных изделий (латунные шпильки, накладки и т. д.). Корпус печей большей

емкости изготавливают полностью из немагнитной стали, меди, бронзы или алюминия в виде конструкций, не образующих замкнутых контуров.

Дальнейшее уменьшение электрических потерь внутри корпуса может быть достигнуто либо путем увеличения размеров корпуса печи, либо путем установки между корпусом печи и индуктором дополнительного магнитопровода (электрический экран), выполненного в виде металлической вставки из материалов с малым удельным электрическим сопротивлением. В этом случае магнитный поток вне полости индуктора, проходящий через внешний магнитопровод, зависит от соотношения длин магнитопровода  $h_{мп}$  и индуктора  $h_{и}$ , а также соотношения наружного диаметра индуктора  $D_{и}$  и диаметра внутренней окружности магнитопровода  $D_{мп}$  (рис. 3.4).

Для наиболее эффективного снижения массы магнитопровода лучше всего размещать его пакеты на некотором расстоянии от индуктора. Экспериментально было установлено, что при увеличении  $h_{мп}/h_{и}$  и уменьшении  $D_{мп}/D_{и}$  относительная величина магнитного потока, проходящего через экран, уменьшается (рис. 3.5).

Если пренебречь падением напряжения в индукторе, то полный магнитный поток составит, Вб,

$$\Phi = \frac{U}{4,44 f \omega},$$

где  $U$  – напряжение, подаваемое на индуктор, В;

$f$  – частота изменения тока, Гц;

$\omega$  – число витков индуктора печи.

Для выбранного геометрического размера индуктора и экрана по данным рис. 3.5 устанавливают  $\frac{\Phi_{мп}}{\Phi}$  и далее получают

$\Phi_{мп} = \left( \frac{\Phi_{мп}}{\Phi} \right) \Phi$ . Если задать допустимое значение магнитной

индукции по минимуму удельных потерь мощности, вызывающей нагрев магнитопровода  $B_{доп}$  в магнитопроводе, то полезное сечение ферромагнитного экрана составит, м<sup>2</sup>,

$$S_{мп} = \frac{\Phi_{мп}}{B_{доп}}.$$



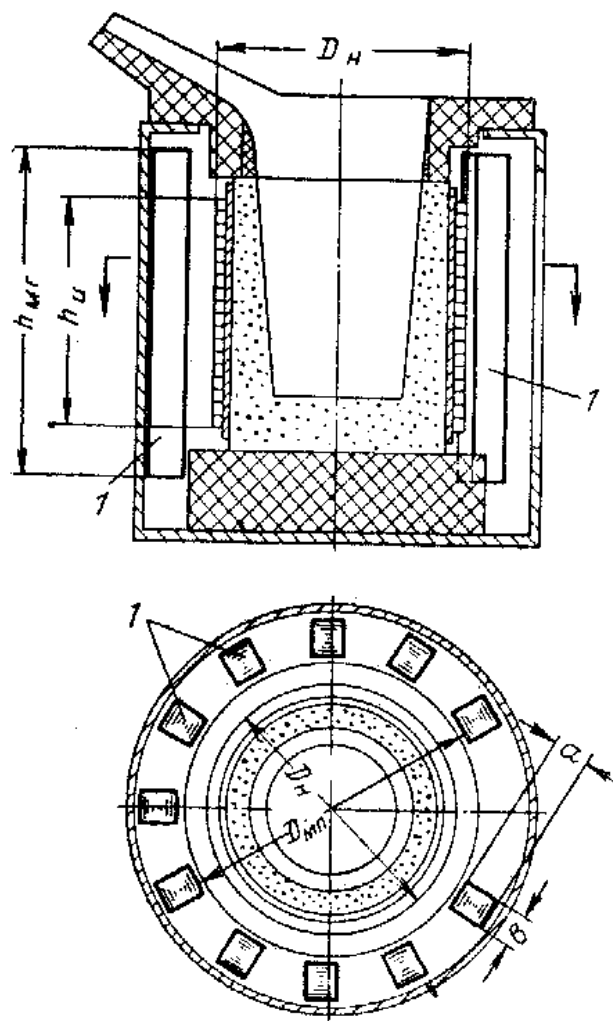


Рис. 3.4. Размещение пакетов внешнего магнитопровода (1)

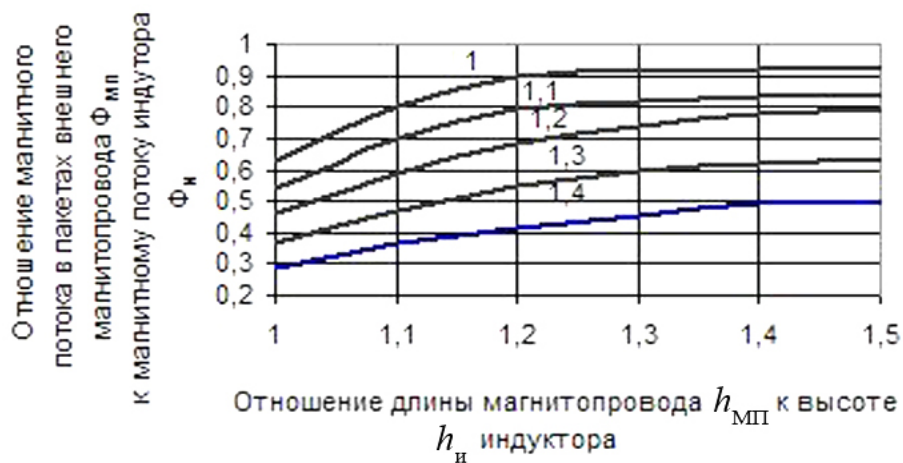


Рис. 3.5. Зависимость доли величины магнитного потока в пакетах внешнего магнитопровода в общем магнитном потоке индуктора  $\Phi_{мп} / \Phi_{и}$  от геометрических параметров макетов  $h_{мп}$  и индуктора  $h_{и}$  (цифры у кривых – отношение  $D_{мп}/D_{и}$ )

При промышленной частоте 50 Гц  $B_{\text{доп}} = 0,6$  Тл; для частот 500–2500 Гц  $B_{\text{доп}} = 0,15 \dots 0,05$  Тл.

Общее число пакетов экрана  $n$  выбирают в зависимости от конструктивных особенностей печи. Каждый пакет экрана выполняют из листов трансформаторной стали, изолированных лаковым покрытием. Толщина каждого листа при промышленной частоте тока равна 0,5 мм, при повышенной частоте – 0,35 мм.

Длина пакета магнитопровода, м, должна превышать длину индуктора.

$$h_{\text{мп}} = h_{\text{и}} + 4\Delta_m = h_{\text{и}} + 2(D_{\text{в}} + d_0),$$

где  $\Delta_m$  – толщина футеровки тигля, м;

$D_{\text{в}}$  – внешний диаметр корпуса печи, м;

$d_0$  – средний диаметр садки, м.

При монтаже следует располагать индуктор симметрично по отношению к высоте экрана.

Для существенного снижения значения электрических потерь в корпусе печи можно использовать электромагнитный экран в виде замкнутого цилиндрического листа. Его выполняют из материалов с малым удельным электрическим сопротивлением (медь, алюминий) толщиной, равной 1,5–2,0 глубины проникновения тока, и располагают между индуктором и корпусом печи.

### **3.2.2. Индуктор**

Индуктор предназначен для создания переменного магнитного поля заданной напряженности, который индуцирует ток в нагреваемых материалах. В процессе плавки индуктор испытывает радиальные электродинамические усилия, вызванные вибрациями, расширением футеровки, усилиями, возникающими при наклоне печи для слива металла. Кроме того, при расплавлении металла через индуктор проходит существенный тепловой поток от расплавляемого материала. Для предотвращения перегрева индуктора и преждевременного выхода его из строя применяют водяное охлаждение. Это позволяет уменьшить электрические потери и обеспечить надежную электроизоляцию и безаварийность работы агрегата.

Индуктор изготавливают в виде однослойной цилиндрической катушки из медной полый трубки специального профиля (рис. 3.6) (соленоид), витки которого укладываются или в виде спирали (спиральный индуктор) с постоянным углом наклона витков и заданным шагом навивки (рис. 3.7, а), или в виде катушки, все

витки которой располагаются в горизонтальных плоскостях, а переходы между соседними витками осуществляются наклонным участком (индуктор с транспозицией витков) (рис. 3.7, б).

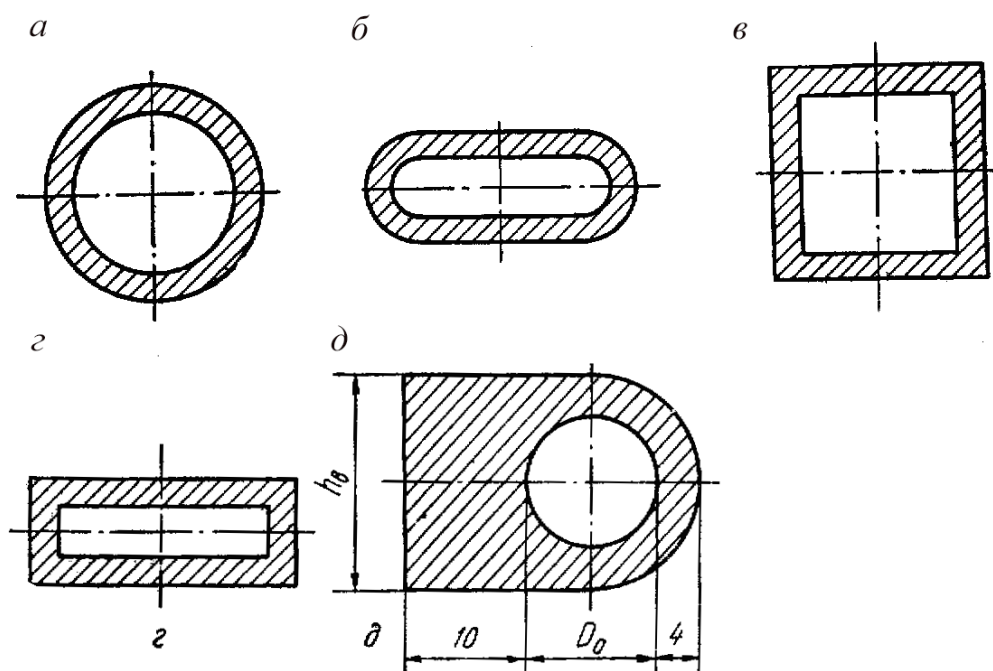


Рис. 3.6. Профили трубки индуктора:  
*а* – круглый (ГОСТ 617–72); *б* – овальный; *в* – квадратный (ГОСТ 16774–71);  
*г* – прямоугольный (ГОСТ 16774–71); *д* – неравностенный (*D*-образный)

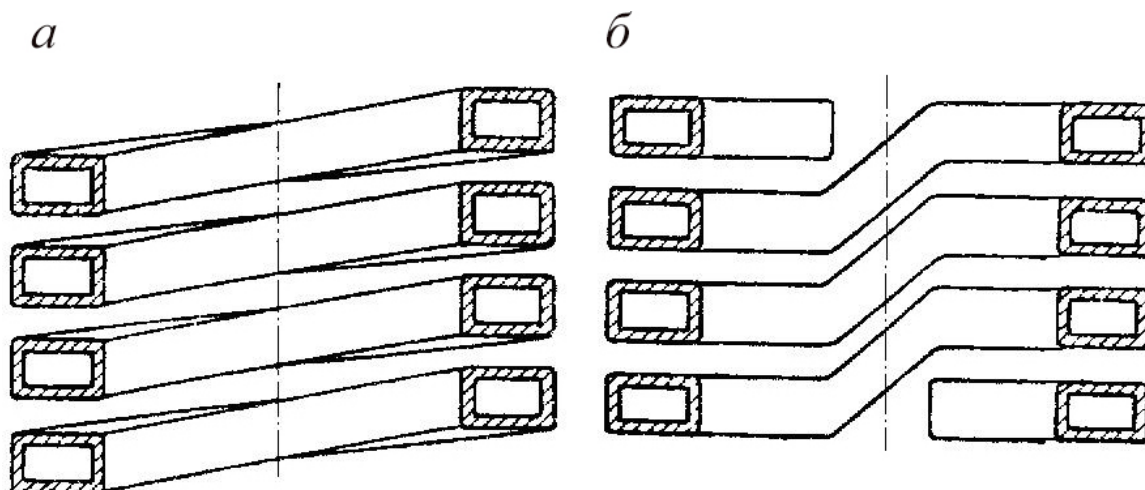


Рис. 3.7. Индукторы со спиральной навивкой (*а*) и с транспозицией (*б*)

Жесткость конструкции индуктора может быть обеспечена двумя способами:

1) при наличии электроизоляционного промежутка между витками креплением каждого витка к независимым изоляционным стойкам с помощью приваренных к нему латунных шпилек;

2) сжатием всех витков между двух плит из изоляционного материала с фиксацией вертикальными стойками. В этом случае витки между собой изолируют прокладками из пиканита, стеклоленты или обмазки.

Водяное охлаждение обеспечивает надежность отвода теплового потока от расплавленного металла через футеровку тигля при обеспечении следующих условий:

а) температура воды не должна превышать температуры выпадения солей жесткости ( $35\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для предотвращения образования накипи внутри трубок и ухудшения теплоотвода от них;

б) температура индуктора не должна быть ниже температуры окружающей среды. В противном случае будет происходить конденсация паров воды и запотевание индуктора, что может привести к пробое изоляции между витками;

в) напор потребляемой воды не должен превышать 2 атм для обеспечения возможности использовать обычную водопроводную воду, поэтому система водяного охлаждения может быть секционирована при параллельном соединении секций охлаждения.

### **3.2.3. Огнеупорная футеровка**

Огнеупорная футеровка тигельной индукционной печи состоит из тигля, образующего плавильное пространство и определяющего емкость печи; подины, служащей основанием, на которое устанавливают тигель и индуктор; леточной керамики (носок), предназначенной для формирования струи жидкого металла при сливе его из тигля; воротника, соединяющего тигель и леточную керамику; крышки, футерованной шамотными огнеупорами.

Тигель должен обеспечивать удобство ведения металлургического процесса при минимуме тепловых потерь, максимальном электрическом КПД и достаточную механическую прочность. Для удовлетворения этим требованиям по практическим данным соотношение среднего внутреннего диаметра тигля  $d_0$  и высоты тигля  $h$  должно составлять  $d_0/h = 0,6\text{--}1,0$  при средней толщине стенки  $\Delta_m = (0,1\text{--}0,25)d_0$  (рис. 3.8).

Для обеспечения механической прочности тигля, заполненного металлом, толщину его стенки по высоте делают переменной, а внутреннюю поверхность выполняют в виде конуса с углом наклона образующей  $\alpha = 2\text{--}4^{\circ}$ . Сопряжение вертикальных стенок с днищем выполняют под углом  $45\text{--}50^{\circ}$  либо с плавным переходом.

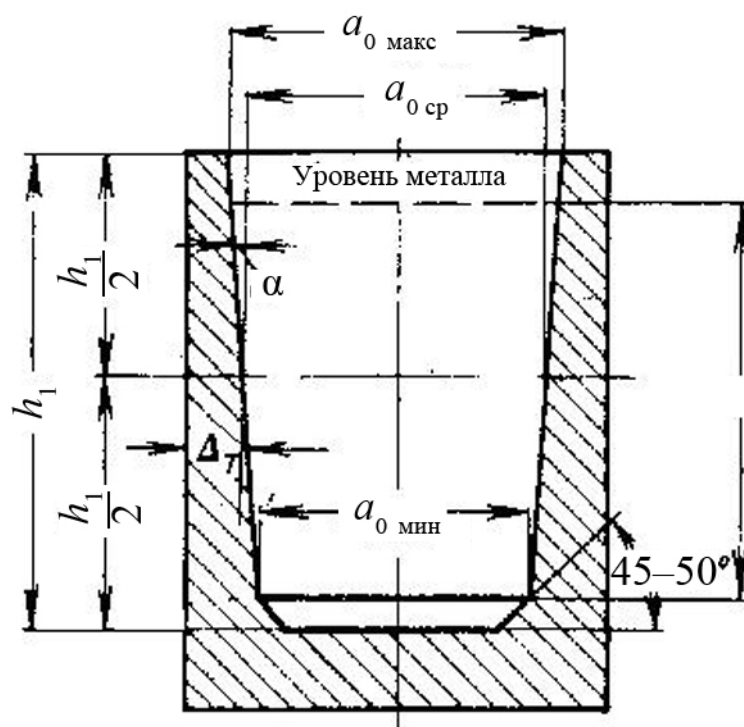


Рис. 3.8. Продольное сечение тигля

Стойкость тигля определяет длительность работы печи между ремонтами. Во время плавки тигель испытывает тепловое, коррозионное и эрозионное воздействие жидкого металла, химической коррозии шлака, статическое давление столба жидкого металла, механические усилия при загрузке шихты и ведении плавки. Поэтому к огнеупорным свойствам и качеству футеровки предъявляют особые требования:

1) материал тигля должен обладать высокой огнеупорностью и термостойкостью, химической стойкостью по отношению к расплавленному металлу и шлаку при рабочих температурах;

2) сохранять теплоизоляционные свойства и минимальную электропроводность во всем диапазоне рабочих температур;

3) обладать механической прочностью в условиях воздействия высоких температур, большого металлостатического давления, значительных механических усилий при загрузке исходной шихты, обслуживании и чистке;

4) иметь минимальную толщину стенок для обеспечения высокого электрического КПД;

5) материал тигля должен иметь минимальный коэффициент линейного (объемного) расширения для исключения возникновения трещин в его стенке при разогреве;

б) технология изготовления и уход за тиглем должны обеспечивать высокую стойкость и минимальное количество экзо- и эндотермических включений в металл, обеспечивая стабильность ведения металлургического процесса.

Для индукционных тигельных печей можно применять кислую, основную и нейтральную огнеупорную футеровку. В зависимости от марки выплавляемого металла, уровня температур и особенностей технологии выбирают соответствующий состав футеровочных материалов.

Кислую футеровку изготавливают из кремнеземистых материалов (кварцит, кварцевый песок, молотый динасовый кирпич) с содержанием  $\text{SiO}_2$  не менее 93–98 %. В качестве связующей (упрочняющей) добавки используют сульфидно-целлюлозный экстракт с добавлением 1,0–1,5 % борной кислоты в качестве минерализатора. Огнеупорная масса может иметь следующий зерновой состав: 5 % зерен 3–2 мм; 50 % зерен 2–0,5 мм и 45 % зерен менее 0,5 мм.

Стойкость кислых тиглей составляет 80–100 плавов.

Основную футеровку выполняют преимущественно из магнезита в предварительно спеченном или плавленном состоянии, обладающего высоким постоянством объема. Для уменьшения усадки при высоких температурах (1500–1600 °С) и обеспечения некоторого ее роста при умеренных температурах (1150–1400 °С), что предотвращает образование усадочных трещин, применяют добавки минерализатора (хромовая руда, кварцевый песок, кварциты). В качестве связующего материала при изготовлении основной футеровки используют глину (3 % от массы магнезита) с увлажнением ее водным раствором жидкого стекла или патоки (до 12 %). Огнеупорная масса должна иметь гранулометрический состав: 50 % зерен 6–0,5 мм; 15 % зерен 0,5–0,18 мм; 35 % зерен менее 0,18 мм. Стойкость такой футеровки колеблется в пределах от 18–20 плавов до 40–50 плавов.

Нейтральная футеровка состоит в основном из аморфных оксидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Она характеризуется более высокими эксплуатационными показателями по сравнению с кислой и основной футеровкой. Однако стоимость ее изготовления существенно выше, что ограничивает более широкое применение таких материалов.

Футеровка индукционных печей может быть изготовлена одним из следующих методов:

1) набивкой футеровочных материалов по стальному шаблону с формой внутренней поверхности печи непосредственно в ней. Шаблон устанавливается на подине строго по оси печи, а порошкообразные огнеупорные материалы засыпают в зазор между индуктором и шаблоном послойно с последовательным уплотнением пневматической или электрической трамбовкой;

2) изготовлением футеровки внепечным методом в виде спрессованного изделия на специальных прессах в пресс-формах. Тигли, изготовленные таким методом, помещают в индуктор печи и засыпают с боковой стороны порошкообразными огнеупорными материалами для придания определенной жесткости конструкции и предотвращения возможности прорыва жидкого металла к индуктору при нарушении целостности тигля. Такой метод позволяет сократить объем ремонтных работ и сроки их выполнения при смене тигля;

3) изготовлением футеровки из фасонных изделий. В этом случае необходимо предусмотреть возможность изготовления буферного слоя из огнеупорной засыпки толщиной 25–30 мм между индуктором и тиглем, способным компенсировать тепловые расширения основной массы футеровки при ее разогреве;

4) послойной наваркой футеровки путем торкретирования или плазменного напыления контактных рабочих слоев на изготовленную любым методом футеровку. Такой метод позволяет получать химически чистую и компактную высокоогнеупорную поверхность футеровки со стороны металла.

Подина является основанием для размещения тигля и индуктора, для чего на нижнюю часть каркаса печи устанавливают рамку, закрепляя ее латунными шпильками, и на ней же располагают подовую плиту (подину), которую для небольших печей емкостью 50–100 кг изготавливают из шамотных блоков 1 (рис. 3.9), укрепленных при помощи накладок 2 и шпилек 3 из немагнитных материалов.

Между блоками оставляют зазоры шириной 15 мм для компенсации тепловых расширений. Недостатком такого типа подин является трудность замены шамотных блоков и их относительная дороговизна, поскольку они являются нестандартными изделиями для огнеупорных заводов.

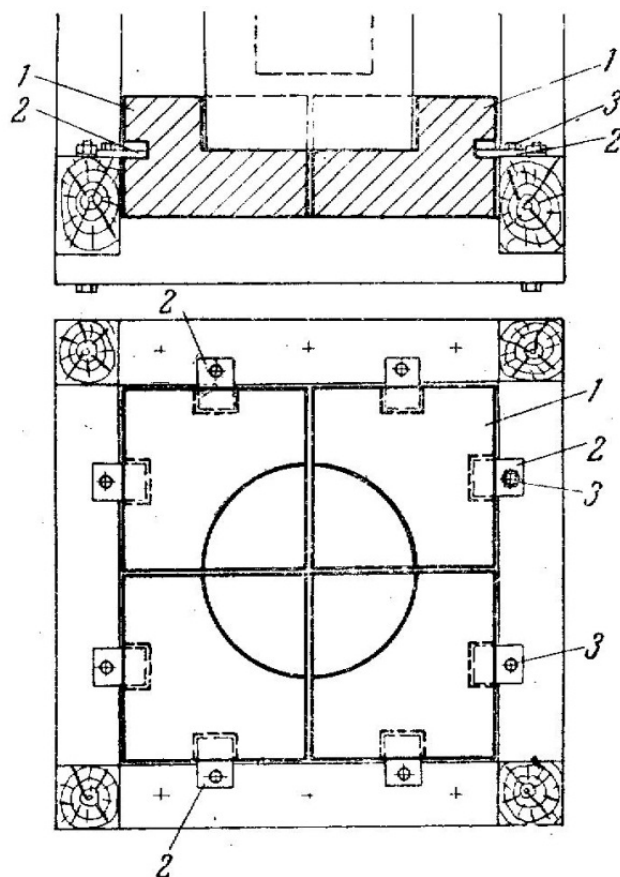


Рис. 3.9. Устройство подины:  
1 – шамотные блоки; 2 – накладки;  
3 – шпильки

Подину можно изготавливать из огнеупорного бетона, который заливают непосредственно на основание печи, покрытого асбоцементными листами, или в опалубку. В качестве материала подины могут быть использованы текстолитовые или асбоцементные плиты, а также фасонные шамотные кирпичи.

Леточная керамика предназначена для формирования струи металла при наклоне печи. Основной ее частью является носок, по которому течет металл.

Леточную керамику (рис. 3.10) изготавливают из стандартных шамотных кирпичей 1, которые уложены на огнеупорном растворе из молотого шамота и увлажненной глины на асбоцементную плиту 2, укрепленную на верхней раме каркаса.

Носок 3 изготавливают в основном в виде сплошного шамотного блока соответствующей формы, а для печей малой емкости выдалбливают в кирпиче. Часть футеровки, обрамляющая проем над тиглем, называется *воротником*. Его часто накрывают асбоцементной плитой. Щели между блоками и тиглем заполняют обмазкой.



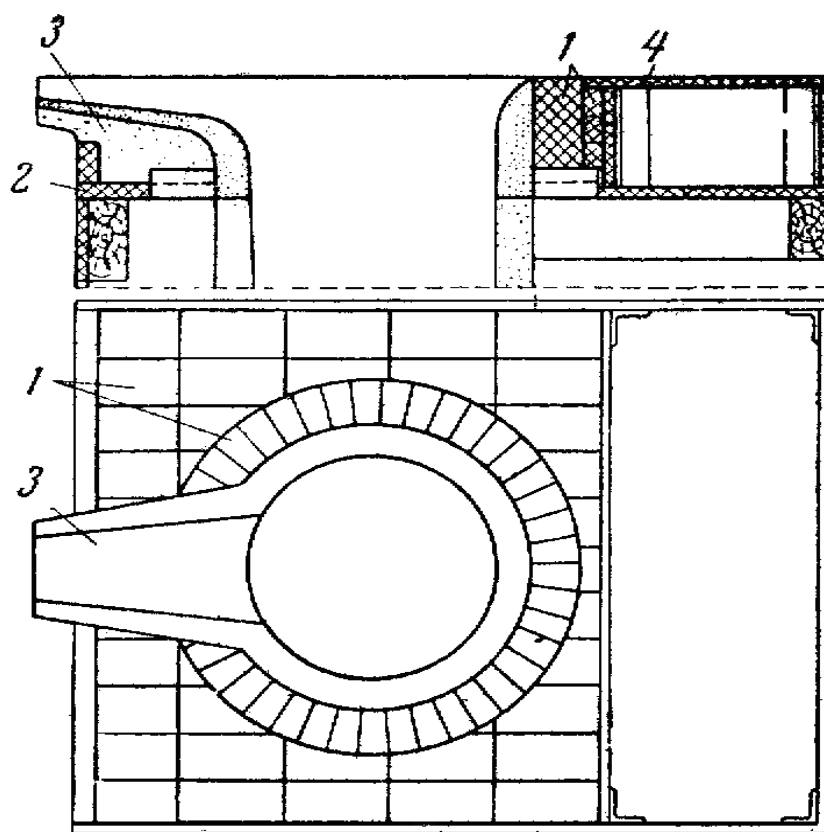


Рис. 3.10. Леточная керамика индукционной печи:

1 – шамотные кирпичи; 2 – асбоцементная плита;  
3 – носок; 4 – воротник

Свод предназначен для снижения тепловых потерь с поверхности расплавленного металла. Для открытых печей свод выполняют откидывающимся из конструкционной стали, футерованной изнутри. Открывание крышки осуществляют либо вручную с помощью рычагов (печи малой емкости), либо с помощью специального привода (гидро- или электромеханического).

#### **3.2.4. Механизм наклона тигля и поворота свода**

Для слива металла из тигля после окончания плавки печь наклоняют на  $95-100^\circ$ . Для того чтобы уменьшить длину струи металла и не перемещать разливочный ковш вслед за изменением положения носка тигля, ось наклона печи располагают вблизи носка или непосредственно под ним.

Наклон печи производят одним из способов:

1) с помощью ручного привода или рычагов (только для лабораторных установок);

2) тельфера или другого подъемного механизма, установленного в цехе (рис. 3.11, *а*). При этом крюк подъемного устройства закрепляют за специальную скобу, предусмотренную на каркасе печи;

3) электромеханического привода, состоящего обычно из электродвигателя, редуктора и цепной передачи, установленных на опорной раме печи;

4) гидропривода, включающего маслonaпорную установку для создания давления жидкости в системе, плунжеры и гидроцилиндры, шарнирно связанные с корпусом печи (рис. 3.11, *б*). Для наклона печи на две стороны гидравлический механизм снабжается двумя парами цилиндров (рис. 3.11, *в*).

Последний вид механизма наклона получил наибольшее распространение благодаря простоте конструкции и обеспечению плавности хода. Маслonaпорную установку располагают обычно рядом с печью, вне рабочей площадки. Пульт управления размещают на рабочей площадке, в месте, удобном для наблюдения за процессом слива металла. Основным недостатком этого типа механизма следует считать необходимость иметь под печью значительное пространство для установки гидроцилиндров.

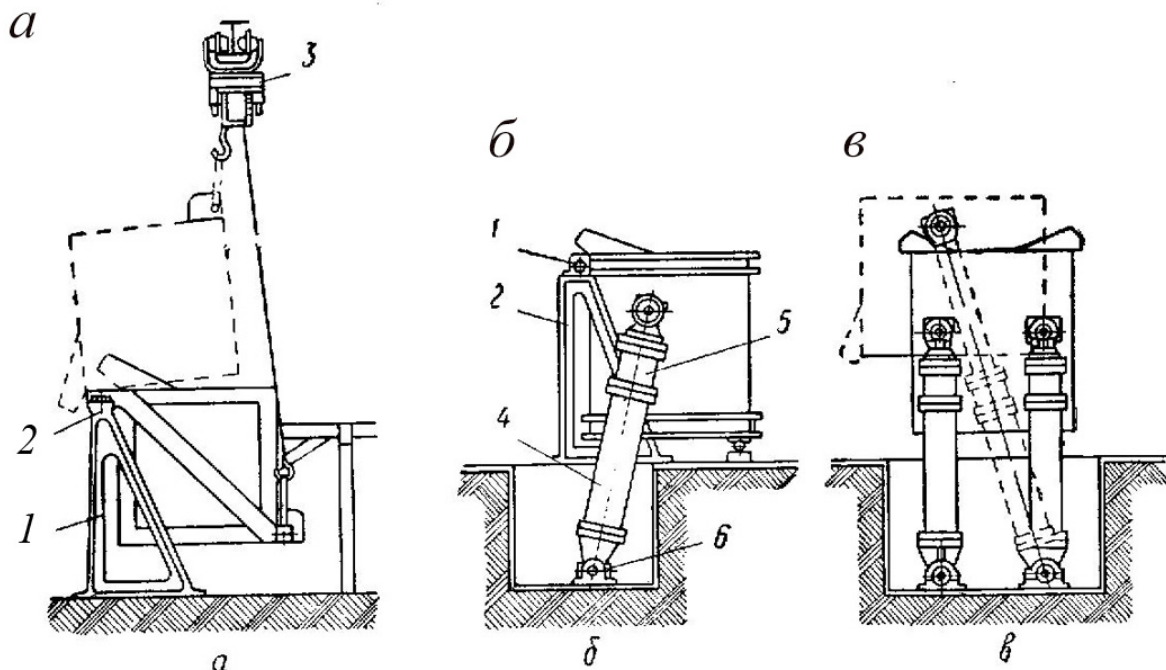


Рис. 3.11. Схемы механизмов наклона индукционных тигельных печей:

*а* – использование кран-балки; *б, в* – гидроцилиндров;

1 – ось наклона печи; 2 – опорная стойка; 3 – тельфер; 4 – цилиндр; 5 – плунжер;

б – опора цилиндра; положение печи при наклоне

Для удобства снятия и закрытия герметичной крышки используют механизм поворота свода, который представляет собой простые рычажные или кулачковые приспособления, позволяющие легко приподнимать крышку на 1–2 см, после чего отводить ее в сторону.

Для поворота свода печей большой емкости используют гидравлические цилиндры. Для уменьшения излучения из тигля над ним устанавливают футерованную крышку (см. поз. 5 рис. 3.3 на с. 106).

### 3.2.5. Контактное устройство

Контактное устройство (рис. 3.12) соединяет индуктор с токоподводом и предусматривает возможность наклона печи во время разливки металла. Возможно два типа их конструкции: жесткое разъемное соединение; гибкое неразъемное.

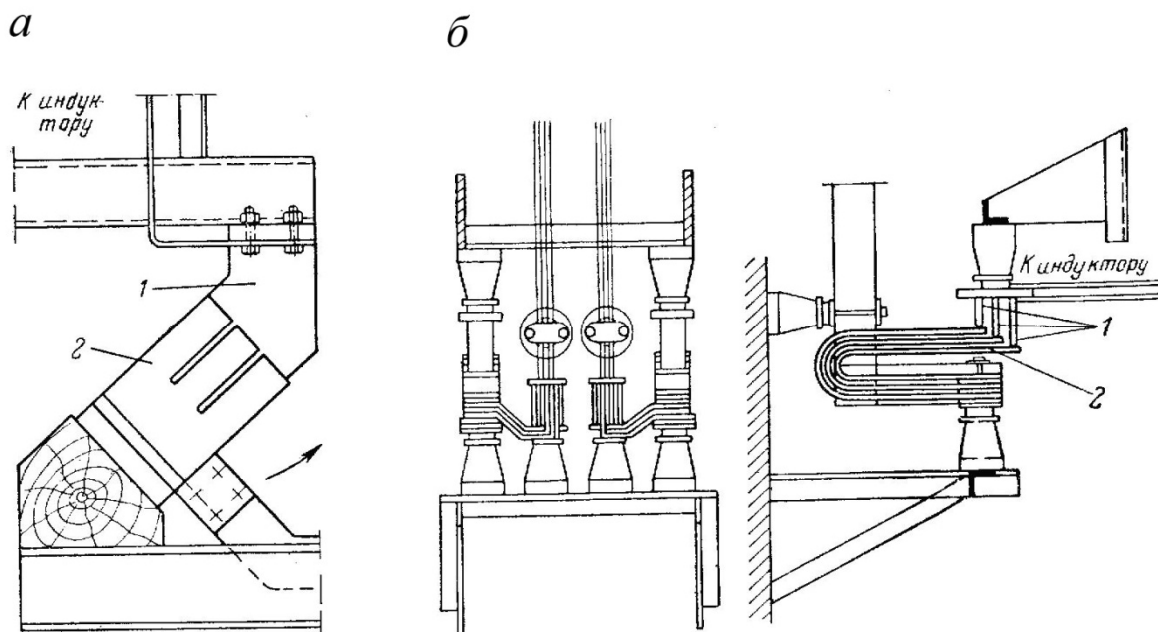


Рис. 3.12. Конструкция разъемного соединения индуктора с токопроводом:

*a* – жесткое соединение контактной части; *б* – гибкое:

1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт

При использовании жесткого разъемного соединения подвижные контакты, установленные на корпусе печи, соприкасаются с неподвижными при нормальном вертикальном положении агрегата и выходят из соприкосновения при его наклоне. При наклоне подвижные контакты отходят в направлении, указанном стрелкой. Соединение печи при помощи врубных ножей (рис. 3.12, *a*), при недостаточной точности изготовления подшипников оси

вращения печи приводит к тому, что подвижный контакт 1 (нож) может не попасть в зазор между неподвижными контактами 2, в результате чего он может выйти из строя. Этого дефекта лишена гибкая конструкция, изображенная на рис. 3.12, б. Ее подвижные контакты 1 соприкасаются при нормальном вертикальном положении печи с неподвижными пружинными контактами 2 и осуществляют соединение свободным нажатием.

Для недопущения перегрева контактов их охлаждают водой.

Соединение индуктора с токоподводом при помощи гибкого кабеля значительно снижает энергетические потери, устраняет трудности подгонки подвижных и неподвижных контактов, не требует заботы об их чистоте. В то же время этой форме соединения присущ ряд дефектов:

а) возникновение добавочных электрических потерь (до 10–20 % активной мощности печи) за счет увеличения длины проводников;

б) увеличение расхода меди;

в) увеличение индуктивного сопротивления токопровода, что вызывает возрастание падения напряжения в токоподводящей сети.

### **3.3. Электрическая схема питания индукционных тигельных печей**

Основными элементами электрической схемы индукционной плавильной установки с тигельными печами являются:

- 1) индуктор;
- 2) источник питания (в виде трансформатора с переключателем ступеней напряжения для системы питания промышленной частоты; машинного генератора или тиристорного преобразователя с рабочей частотой 500–1000 Гц или лампового (электронного) генератора с рабочей частотой 10 000 Гц и выше);
- 3) конденсаторная батарея;
- 4) токопровод, соединяющий индуктор с конденсаторной батареей и источником питания;
- 5) коммутационная аппаратура для включения печи и переключения конденсаторов и витков индуктора;
- 6) регулирующие трансформаторы и контрольно-измерительные приборы;
- 7) защитная и сигнальная аппаратура;

8) система автоматического регулирования электрического режима (АРЭР), в т. ч. регуляторы напряжения и тока генератора, регулятор коэффициента мощности и система автоматического переключения витков индуктора.

В комплект (рис. 3.13) индукционной плавильной установки повышенной частоты входят, как правило, две индукционные тигельные печи, источник питания повышенной частоты, агрегат возбуждения, шкаф управления генератором, контактный шкаф с автотрансформаторным пускателем, аппаратура сигнализации на случай аварийной ситуации, конденсаторная батарея, маслonaпорная установка для гидравлического оборудования с пультом управления. Все электрооборудование объединено в генераторные станции, поставляемые заводами-изготовителями плавильных установок.

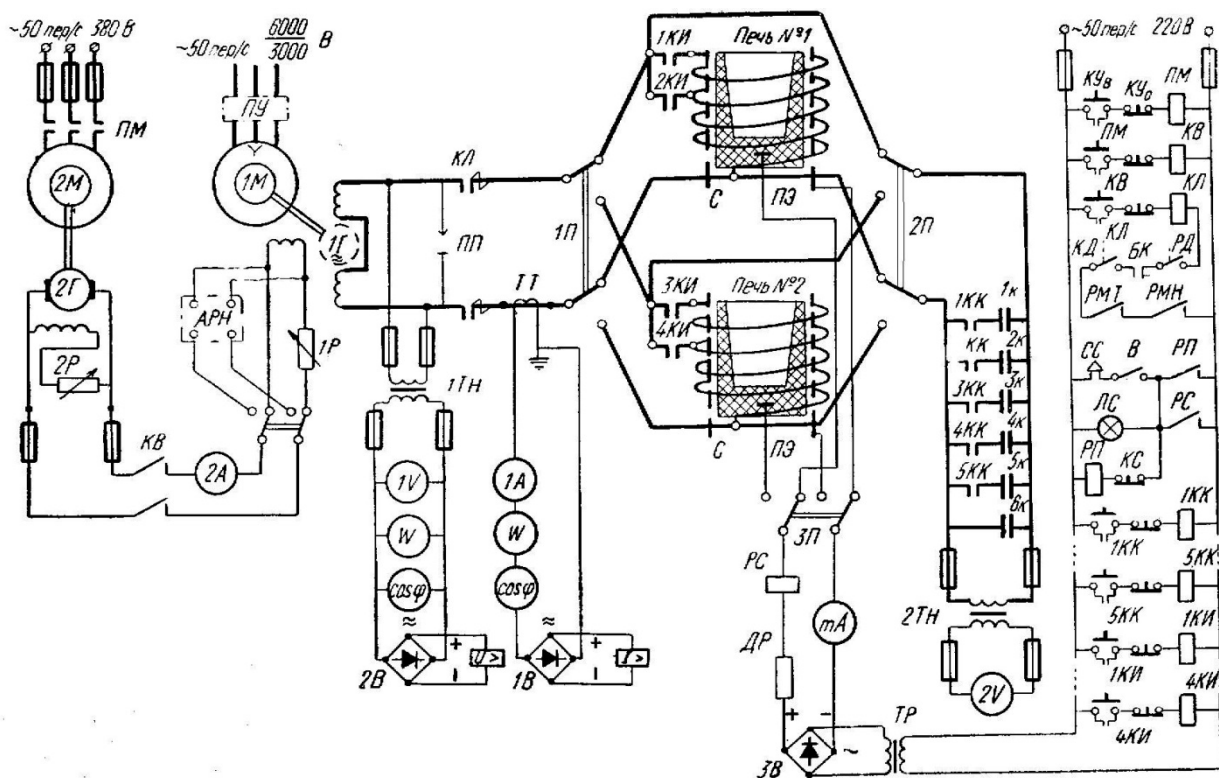


Рис. 3.13. Принципиальная схема питания и управления индукционной плавильной установкой с двумя тигельными печами повышенной частоты

В процессе работы индукционных установок одна тигельная печь находится в эксплуатации, а во второй осуществляют набивку, сушку и подготовку тигля к плавке.

Конденсаторная батарея (1К–6К) включается по схеме резонанса токов параллельно индуктору. Для изменения реактивной мощности металла в процессе плавки (изменение

параметров садки при нагреве, добавление шихты в тигель по мере расплавления и т. п.) используют подстройку коэффициента мощности, подключая различное количество конденсаторных батарей при помощи контакторов 1КК–5КК. Для контроля за изменением коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) в контуре ИП-КБ служит фазометр. Конденсаторная батарея выполняется в виде стальных открытых шкафов, в которых в нижней их части устанавливаются конденсаторы в один или два этажа. В верхней части шкафов монтируются контакторы для переключения конденсаторов.

Для предотвращения опасности пробоя конденсаторных батарей из-за коммутационных перенапряжений их подключают только при обесточенной цепи. Для повышения безопасности при ошибочном отключении конденсаторов используют соответствующую блокировку (блок-контакт БК в цепи катушки главного контактора КЛ). Кроме того, чтобы избежать включения конденсаторной батареи без охлаждения на охлаждающей магистрали предусматривается реле давления воды РД с контактами, включенными в цепь катушки главного контактора КЛ. Это позволяет подключать печь только при наличии охлаждающей воды в конденсаторной батарее.

Подключение генератора повышенной частоты 1Г и конденсаторной батареи 1К–6К к любой из двух индукционных печей производят при помощи переключателей 1П и 2П при обесточенной цепи. Добавочные отводы индуктора присоединяют к цепи контакторами 1КИ–2КИ или 3КИ–4КИ.

Плавная подача напряжения на индуктор обеспечивается реостатом 2Р в цепи возбуждения генератора постоянного тока (возбудитель) 2Г. При использовании для питания специального выпрямителя плавное регулирование напряжением осуществляют автотрансформатором. Режим работы силовой части установки контролируют при помощи измерительных приборов, число которых позволяет следить за двумя независимыми электрическими цепями: за цепью приводного электродвигателя и цепью генератор – конденсаторная батарея – индукционная печь. Вторая цепь включает в себя цепи генератора с участком до разветвления, цепи конденсаторов и индукционной печи. Наличие двух трансформаторов напряжения 1ТН и 2ТН вызвано различием напряжений на зажимах генератора повышенной частоты и конденсаторной батареи, подсоединение которых может быть осуществлено к разным виткам индуктора.

В качестве измерительных приборов наиболее часто используются амперметры 1А и 2А, вольтметры 1V и 2V, ваттметр W и фазометр  $\cos\varphi$ .

Для контроля за состоянием футеровки тигля при работе сталеплавильных печей используют сигнализатор проедания тигля типа АСЧ, работа которого основана на контроле активного сопротивления футеровки во время плавки. Он состоит из двух электродов. Один из них (С) устанавливают аксиально индуктору в виде цилиндрической металлической сетки, разрезанной по образующей. Другой электрод располагают в подине в виде карборундового стержня 1ПЭ. Питание сигнализатора осуществляется от сети через отдельный трансформатор ТР и выпрямитель 3В. При уменьшении сопротивления тигля в процессе абразивного износа или образования трещин в футеровке возрастает сила тока, протекающего через миллиамперметр  $mA$ , добавочное сопротивление ДР и обмотку аварийной сигнализации РС. При замыкании контактов РС включается промежуточное реле РП и сигнальная лампа ЛС с сиреной СС, которую при необходимости можно отключить выключателем В. Контакты РП, блокируя обмотку РП, обеспечивают сигнализацию и после выключения печи. Сигнальное устройство может быть дополнено системой автоматического выключения и выдува воды из индуктора сжатым воздухом после отключения питания индуктора для устранения возможности взрыва.

Сигнальное устройство может быть подключено при помощи переключателя ЗП к любой из двух печей. Отключение сигнала сирены производят кнопкой КС, обесточивая обмотку РП и размыкая контакты РП.

### **3.4. Расчет и проектирование тигельных индукционных печей**

В задании на проектирование тигельной индукционной печи указывается наименование и состав металла или сплава, который будет выплавляться в печи, его характеристика (температура плавления и разлива, удельное сопротивление в холодном состоянии, при температуре точки Кюри, в расплавленном состоянии и пр.), производительность агрегата или его емкость, параметры электрической сети, к которой будет присоединена установка. Итогом проектирования печи является определение ее рациональных конструктивных особенностей с установлением основных геометри-

ческих размеров, электрических параметров агрегата (активная мощность, частота, напряжение и числа витков индуктора, реактивная мощность конденсаторной батареи и др.), технико-экономические показатели работы установки.

С целью обеспечить надежную работу установки рассчитывают и проверяют возможности водяного охлаждения индуктора и других элементов печи. Для обеспечения комплектности установки выбирают элементы ее комплектующего оборудования. Рассчитывают прочность элементов конструкции печи, испытывающих механические нагрузки, с учетом условий их работы.

### **3.4.1. Исходные данные**

В исходных данных, представленных в задании на проектирование, приводят следующие.

А) Данные о расплавляемом металле или сплаве.

1. Наименование, марка, состав.
2. Температур: плавления, точки Кюри и разливки, °С.
3. Теплосодержание при температуре разливки или теплоемкость при температурах: 20 °С, плавления и разливки, кДж/кг·град.
4. Удельное сопротивление материалов при температуре 20 °С и плавления. Для ферромагнитных материалов желательно иметь значение удельного сопротивления при температуре точки Кюри.

Данные п. 2–4 устанавливают по справочникам или другим источникам. Кроме того, приводят данные о форме и размере составляющих шихты.

Б) Производительность или емкость печи.

Эти показатели могут быть заданы по-разному.

1. Суточная производительность ( $N_{\text{сут}}$ , т/сут) или производительность за смену ( $N_{\text{см}}$ , т/смену); длительность плавки ( $\tau_1$ , ч); длительность разливки и загрузки ( $\tau_2$ , ч).

2. Полезная емкость тигля ( $G_{\text{т}}$ , т); длительность плавки ( $\tau_1$ , ч)

В) Параметры питающей сети.

1. Напряжение цеховой силовой сети ( $U_{\text{сс}}$ , В) и напряжение питающей сети высокого напряжения ( $U_{\text{вн}}$ , В).

2. Мощность подстанции, к шинам которой будет присоединена печь, ( $P_{\text{подст}}$ , кВт·А)



### 3.4.2. Определение геометрических размеров тигля и индуктора

Если полезная емкость тигля  $G_T$  (масса садки) не задана, то ее определяют из суточной производительности  $N_{\text{сут}}$  или из производительности за смену  $N_{\text{см}}$  по числу плавов в сутки  $n_{\text{сут}}$  или в смену  $n_{\text{см}}$ :

$$n_{\text{сут}} = \frac{24}{\tau_1 + \tau_2}, \quad (3.3)$$

$$n_{\text{см}} = \frac{\tau_{\text{см}}}{\tau_1 + \tau_2}.$$

Массу садки определяют по выражению

$$G_T = \frac{N_{\text{сут}}}{n_{\text{сут}}}, \quad (3.4)$$

$$G_T = \frac{N_{\text{см}}}{n_{\text{см}}}.$$

По массе садки определяют полезный объем тигля,  $\text{м}^3$ ,

$$V_T = \frac{G_T \cdot 10^3}{\gamma_{\text{тл}}}, \quad (3.5)$$

где  $\gamma_{\text{тл}}$  – удельный вес расплавленного металла. Для расплавленной стали  $\gamma_{\text{тл}} = 7,2 \cdot 10^3 \text{ кг / м}^3$ .

Принимая, что форму тигля можно представить в виде цилиндра диаметром  $d_o$  и высотой  $h$ , можно установить, м,

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{4AV_T}{\pi}}, \quad (3.6)$$

где  $A = \frac{d_o}{h}$ . В среднем для большинства печей, независимо от вида выплавляемого металла или сплава, емкости и типа печи,  $A = 0,8$ .

Высоту тигля находят по выражению  $h = \frac{d_o}{A}$ .

Внутренний диаметр индуктора определяют как сумму внутреннего диаметра тигля  $d_o$ , удвоенной толщины его стенки  $\Delta_T$  и стенки асбестового цилиндра или обмазки тигля  $\Delta_{\text{обм}}$ , изолирующих индуктор от тигля (см. рис. 3.8 со с. 112). При увеличении емкости печи толщина тигля должна увеличиваться для повышения его жесткости и возможности противостоять гидростатическому давлению металла. Толщину слоя обмазки по

опытным данным принимают равной 4–10 мм. Для современных печей толщину стенки тигля определяют по выражению, см,

$$\Delta_T = 6 + G_T, \quad (3.7)$$

где  $G_T$  – емкость тигля, т.

В таком случае  $D_{\text{и}}$  вычислим по формуле, м,

$$D_{\text{и}} = d_o + 2[\Delta_T + (0,004 \dots 0,010)]. \quad (3.8)$$

Для обеспечения достаточного нагрева садки у концов индуктора при симметричном расположении относительно тигля его высоту находят по эмпирическому выражению

$$h_{\text{и}} = (1,1 \dots 1,3) h_l. \quad (3.9)$$

При расположении индуктора ниже поверхности металла его высоту принимают равной, м,

$$h_{\text{и}} = h_l(1,05 \dots 1,15) \dots (0,1 \dots 0,2).$$

### 3.4.3. Определение активной мощности печи

Активная мощность печи является частью общей мощности, подводимой к агрегату и выделяющейся непосредственно в садке. Она зависит от требуемой производительности, времени нагрева и теплосодержания металла при температуре разливки. При задании производительности по суточной или сменной производительности, кВт,

$$P_c = \frac{N_{\text{сут}} c_i \cdot 10^3}{860 \cdot 24 \eta} \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1}, \quad (3.10)$$

или

$$P_c = \frac{N_{\text{см}} c_i \cdot 10^3}{860 \tau_{\text{см}} \eta} \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1},$$

где  $N_{\text{сут}}$  и  $N_{\text{см}}$  – соответственно суточная и сменная производительность, т;

$\eta$  – тепловой КПД печи. Для индукционной тигельной печи принимают  $\eta = 0,75 \dots 0,85$ ;

$\tau_{\text{см}}$  – время работы за смену, ч.

Если производительность печи задается через величину садки, то ее активная мощность составляет, кВт,

$$P_c = \frac{G_T c_i \cdot 10^3}{860 \tau_l \eta},$$

где  $G_T$  – емкость садки, т;

$c_i$  – теплоемкость нагреваемого материала, кДж/(кг·град).

Если известен действительный расход энергии на расплавление 1 т металла ( $Q_d$ , кВт·ч/т), то активная мощность печи при различных вариантах задания производительности составит:

$$P_c = \frac{N_{\text{сут}} Q_d}{24} \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1};$$

$$P_c = \frac{N_{\text{см}} Q_d}{\tau_{\text{см}}} \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1};$$

$$P_c = \frac{G_{\text{т}} Q_d}{\tau_1}.$$

Эта составляющая общей мощности печи выделяется не только в садке, но и в индукторе.

#### **3.4.4. Выбор частоты и параметров преобразователя**

При расчетах принимают обозначение  $\rho_{20}$ ,  $\rho_c$ ,  $\rho_{\text{пл}}$  – соответственно удельное сопротивление при температуре 20 °С, точки Кюри и температуре плавления.

Предварительный выбор частоты питающего тока осуществляют в том случае, когда расплавившаяся шихта представляет собой сплошной цилиндр с диаметром, равным среднему диаметру тигля  $d_o$ , и с параметрами: удельное сопротивление расплавленного металла  $\rho_{\text{пл}}$  и магнитная проницаемость  $\mu = 1,0$ . В этом случае проверяют условия нагрева материалов для наиболее невыгодных параметров:

а) при плавке ферромагнитной шихты до момента перехода раплавляемого материала через точку Кюри. В этом случае  $\rho = \rho_c$ ,  $\mu = 1,0$ , шихта не образовала сплошной кусок и представлена в виде кусков с  $d_o = d_{\text{ш}}$ , где  $d_{\text{ш}}$  – средний диаметр куска шихты;

б) при плавке немагнитной шихты для момента начала плавки. В этом случае  $\rho = \rho_{20}$ ,  $\mu = 1,0$  и  $d_o = d_{\text{ш}}$ . Для выбранных условий рассчитывают глубину проникновения тока  $\Delta_s$  и вычисляют аргумент  $\frac{\sqrt{2}r_o}{\Delta_s}$ , где  $r_o$  обозначает средний радиус тигля или средний радиус куска шихты. Нижним допустимым пределом вычисленного аргумента является условие

$$\frac{\sqrt{2}r_o}{\Delta_s} \geq 3,0.$$

Минимальная частота, удовлетворяющая этому условию, будет

$$f_{\min} \geq 4,54 \cdot 10^6 \frac{\rho}{\mu d_0}. \quad (3.11)$$

Мощность выбираемого преобразователя должна покрывать, кроме полезной мощности на нагрев материалов, тепловые потери в окружающую среду, которые для индукционных тигельных печей достигают 25–35 % от общей мощности. В таком случае требуемая мощность преобразователя на стороне повышенной частоты составляет

$$P_{\text{пр}} = (1,25 \dots 1,35) P_c. \quad (3.12)$$

По выбранной мощности  $P_{\text{пр}}$  и минимальной частоте подбирают наиболее подходящий машинный или тиристорный преобразователь или ламповый генератор из производимых в промышленности (табл. 3.2, 3.3). Для печей, питаемых током промышленной частоты, используют понижающие трансформаторы (табл. 3.4). Если в серии отсутствует подходящий преобразователь, удовлетворяющий требуемой мощности, то следует или увеличить длительность плавки  $\tau_1$ , или использовать параллельную работу преобразователей, или выбрать следующий по мощности из справочников. Однако в последнем случае будет наблюдаться снижение КПД установки.

Выбор источника питания определяет величину напряжения на зажимах индуктора печи. Если источник питания присоединяют непосредственно к крайним виткам индуктора, то величину напряжения на индукторе можно принять равной напряжению на зажимах источника питания  $U_{\text{пит}}$  за вычетом падения напряжения в токопроводе (короткая сеть). С учетом возможных электрических потерь принимают, В,

$$U_{\text{и}} = (0,93 \dots 0,96) U_{\text{пр}}.$$

Для выбранного генератора следует использовать наиболее высокое напряжение, обеспечивающее наименьший ток и падение напряжения в токопроводе, а также снижение затрат меди и активные потери.

Если источник питания присоединен к части витков индуктора, то его работу можно рассматривать как работу автотрансформатора, а значение напряжения на его зажимах будет выше значения напряжения источника на величину

$$\frac{U_{\text{и}}}{U_{\text{пр}}} \approx \frac{\omega}{\omega_{\text{пр}}}, \quad (3.13)$$

где  $\omega$  – полное число витков индуктора;

$\omega_{\text{пр}}$  – число витков, к которым подключен источник питания.

Таблица 3.2

Технические характеристики машинных преобразователей  
повышенной частоты

Тип	Генератор			КПД преобразователя $\eta_{\text{пр}}$ , %
	Частота тока, Гц	Мощность, кВт	Напряжение, В	
ВГО-1500-500	500	1500	1600/800	86
ОПЧ-320-1000	1 000	320	800	88
ОПЧ-500-1000	1 000	500	1600/800	90
ВГО-1500-1000	1 000	1500	1600/800	90
ВПЧ-20-2400	2 400	20	400/200	65
ВПЧ-30-2400	2 400	30	400/200	70
ВПЧ-50-2400	2 400	50	800/400/200	65
ВЭП-60-2400	2 400	60	800/400	75
ВЭП-100-2400	2 400	100	800/400	80
ОПЧ-250-2400	2 400	250	800	86
ОПЧ-500-2400	2 400	500	1600/800	90
ВГО-1500-2500	2 575	1500	1500/750	88
ОПЧ-250-4000	4 000	250	800	85
ОПЧ-500-4000	4 000	500	1600/800	87
ВПЧ-12-8000	8 000	12	200/100	70
ВПЧ-20-8000	8 000	20	400/200	65
ВПЧ-30-8000	8 000	30	400/200	70
ВПЧ-50-8000	8 000	50	800/400/200	65
ВЭП-60-8000	8 000	60	800/400	73
ВЭП-100-8000	8 000	100	800/400	79
ВГО-500-8000	8 000	500	750	77
ОПЧ-250-10000	10 000	250	800	82

Выбранное напряжение источника питания необходимо согласовать с номинальным напряжением конденсаторной батареи. Его значение может быть несколько выше напряжения на индукторе вследствие резонанса напряжений в цепи «индуктивное

сопротивление токопровода – емкостное сопротивление конденсаторной батареи». Наиболее часто для плавильных тигельных печей с питанием от машинного генератора или автотрансформатора промышленной частоты напряжение выбирают 500–3150 В.

Таблица 3.3

Технические характеристики тиристорных преобразователей частоты

Показатели	Тип				
	10/10	63/3	100/3	160/3	200/1
Выходная мощность, кВт	10	63	100	160	200
Рабочая частота, Гц	8–10	2–3	2–3	2–3	1
Выходное напряжение, В	150	400	400	400	250
Показатели	Тип				
	ТПЧ-4	ТПЧ-1	ТПЧ-2	ТПЧ 800-1/0,5	
Выходная мощность, кВт	500/250	630	630	800	
Рабочая частота, Гц	2,5/8,0	0,5/1,0	0,15/3	0,5/1	
Выходное напряжение, В	600–1000	600–1000	600–1000	600–1000	

Таблица 3.4

Технические характеристики  
электропечных трансформаторов промышленной частоты

Тип	Номинальная мощность, кВт·А	Напряжение низкой стороны, В	Число ступеней низкой стороны
ЭОМП-100/10-72	400	510–85	11
ЭОМП-1600/10-72	630	510–73	11
ЭОМП-2000/10-73	1000	510–92	11
		1020–184	11
ЭОМН-2700/10-73	1600	525–100	17
		1050–200	17
ЭОМН-4200/10-73	2500	1050–210	17
		2100–420	17

### 3.4.5. Электрический расчет печи

В основе электрического расчета индукционной тигельной печи положены закономерности поглощения электромагнитных волн в металле.

Активная мощность, выделяющаяся в металле, может быть определена по выражению, кВт,

$$P_m = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 d_o h_m \sqrt{\rho_m \mu_m f} \cdot k_{m.p} k_{mp}^2, \quad (3.14)$$

где  $f$  – частота питающего тока, Гц;

$k_{м.р}$  – поправочный коэффициент активной мощности, учитывающий кривизну боковой поверхности садки нагреваемого материала и зависящий от отношения среднего диаметра тигля и глубины проникновения тока в нем (рис. 3.14);

$k_{мр}$  – полный коэффициент магнитного рассеивания,

$$k_{мр} = k'_{мр} + \Delta k_{мр}.$$

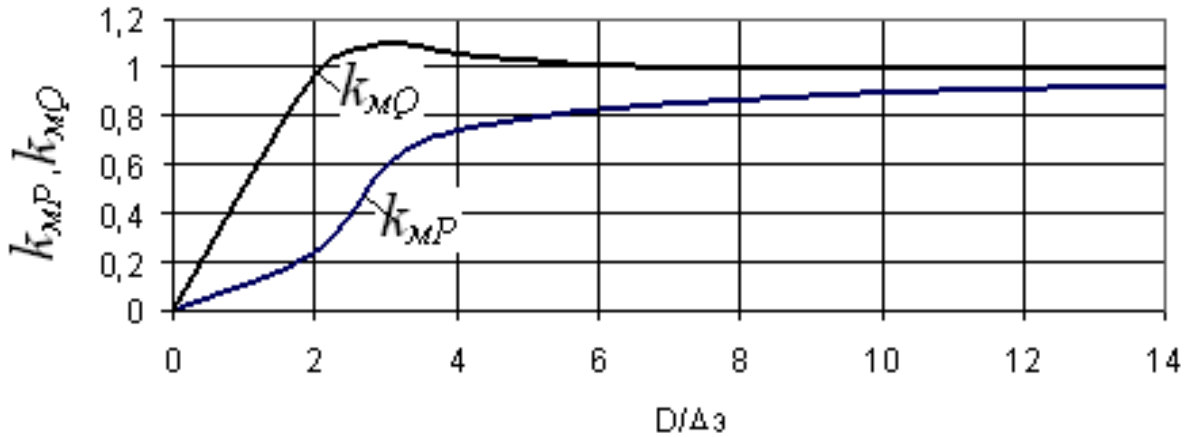


Рис. 3.14. Кривые для определения поправочных коэффициентов при расчете потоков активной  $k_{м.р}$  и реактивной  $k_{м.р}$  мощностей, проходящих через наружную поверхность садки нагреваемого материала  $D_{и}$

Здесь  $k'_{мр}$  – коэффициент магнитного рассеивания. Значение этого коэффициента определяется по данным рис. 3.15 как функция соотношений  $\frac{d_o - \Delta_э}{h_m}, \frac{D_{и}}{h_{и}}, \frac{h_{и}}{h_m}$ .

$$\Delta k_{мр} = \frac{3}{4} \left( 1 / \left( \frac{D_{и}}{\Delta_э} - 1 \right) \right).$$

Активная мощность, теряемая в индукторе, составляет, кВт,

$$P_{и} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_{и} h_{и} \sqrt{\rho_{и} f} \cdot k_{иp} \frac{1}{k_3}, \quad (3.15)$$

где  $k_{иp}$  – поправочный коэффициент активной мощности, учитывающий кривизну индуктора (см. рис. 3.16);

$k_3$  – коэффициент заполнения индуктора  $k_3 = 0,7 \dots 0,9$ .

Реактивная мощность, возникающая в металле, равна, кВ·А,

$$Q_m = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 d_o h \sqrt{\rho_m \mu_m f} \cdot k_{м.р} k_{м.р}^2, \quad (3.16)$$

где  $k_{м.р}$  – поправочный коэффициент реактивной мощности, учитывающий кривизну индуктора (рис. 3.16).

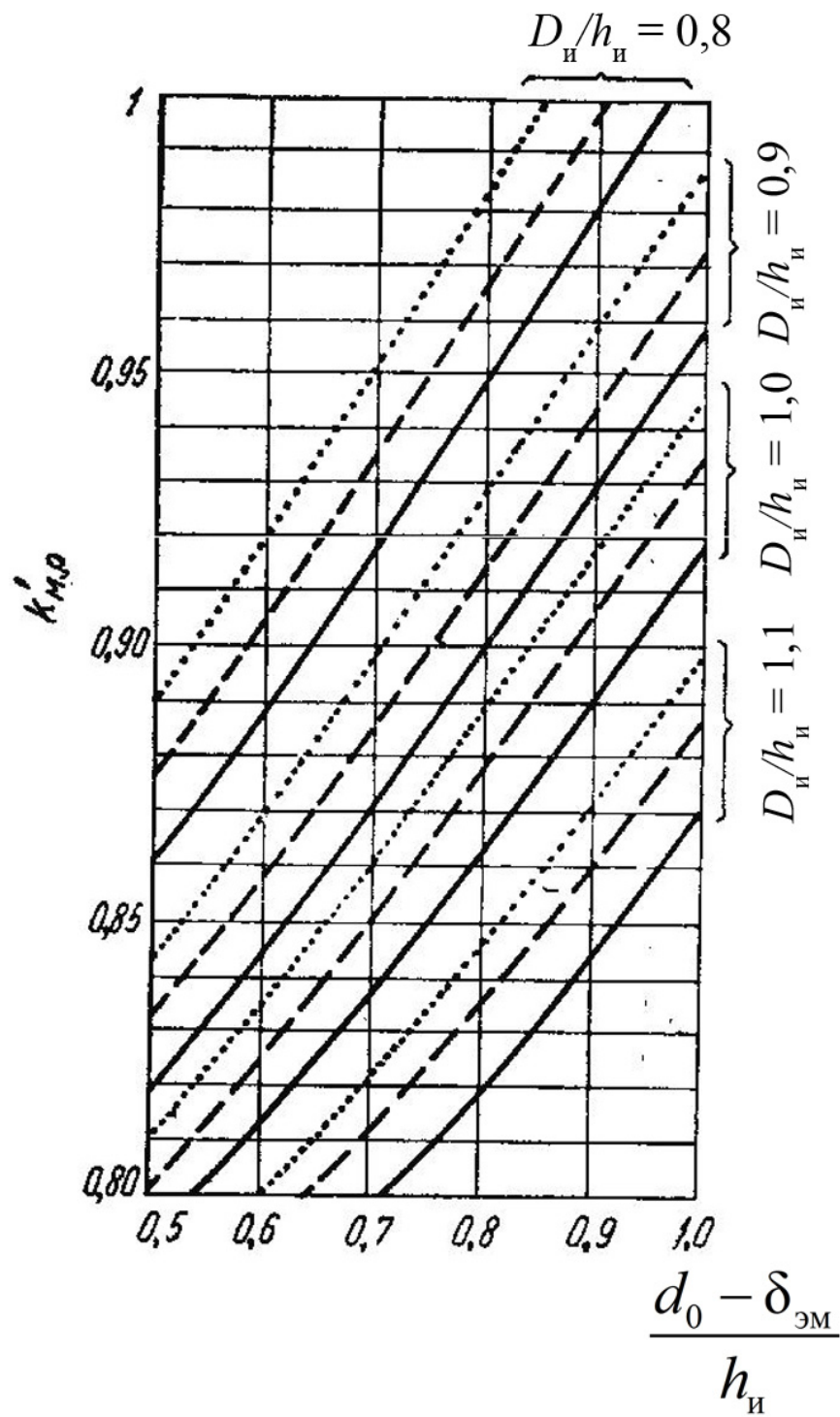


Рис. 3.15. Номограмма для определения коэффициента магнитного рассеивания в зависимости от отношения  $\frac{d_o - \Delta_{эм}}{h}; \frac{D_{и}}{h_{и}}; \frac{h_{и}}{h}$ :

— для отношения  $\frac{h_{и}}{h} = 1,3$ ; -----  $\frac{h_{и}}{h} = 1,2$ ; .....  $\frac{h_{и}}{h} = 1,1$



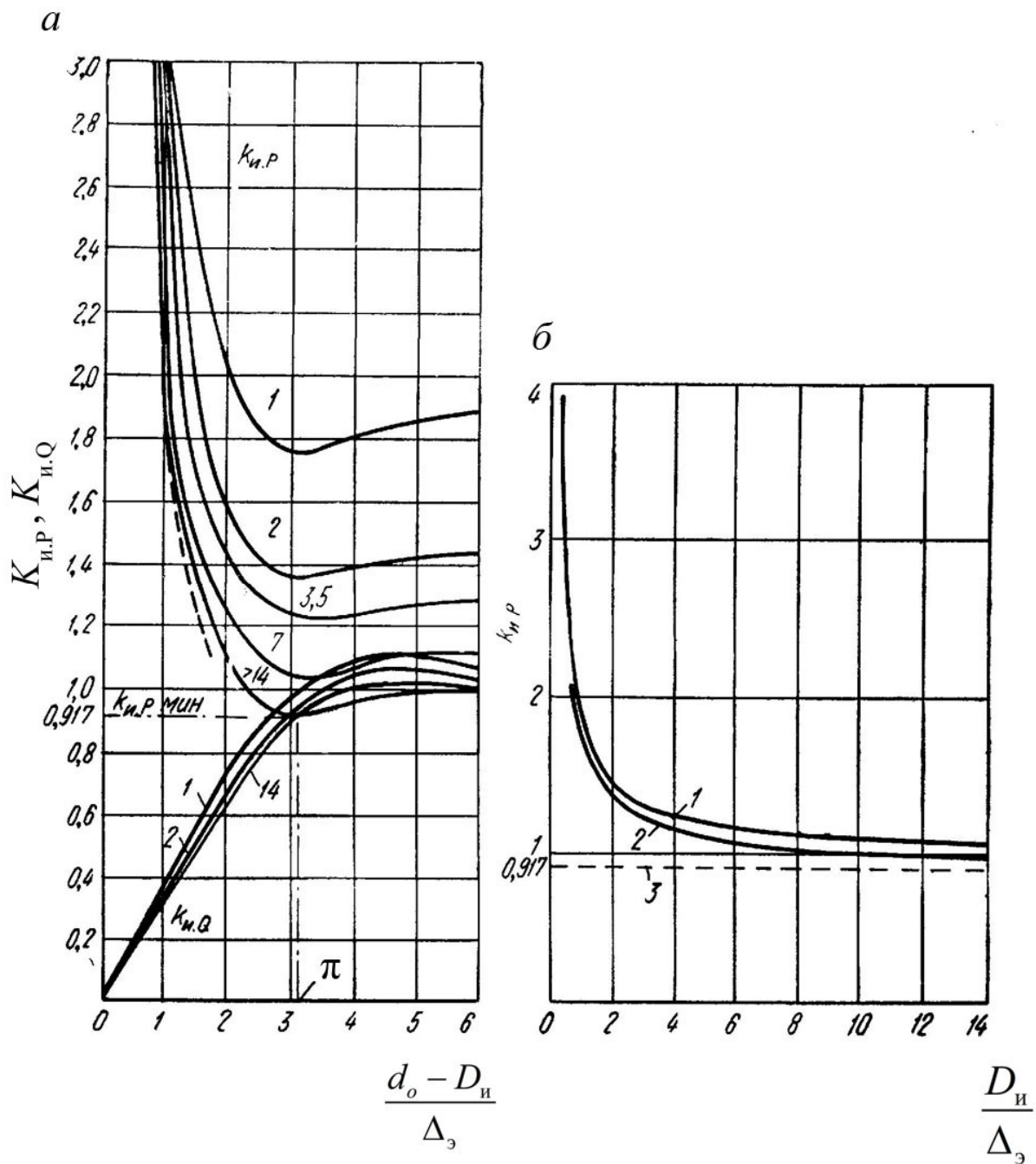


Рис. 3.16. Кривые для определения поправочных коэффициентов при расчете потоков активной ( $K_{н.р}$ ) (*a*) и реактивной ( $K_{н.г}$ ) (*б*) мощности, проходящей через внутреннюю поверхность цилиндрического индуктора. Цифры у кривых – отношение  $n_{и}/n_{м}$

Реактивная мощность, возникающая в зазоре между индуктором и тиглем, составляет,  $\text{кВ} \cdot \text{А}$ ,

$$Q_3 = 6,2 \cdot 10^{-9} (I\omega)^2 f d_o^2 h \left[ \left( \frac{D_{и}}{d_o} \right)^2 - 1 \right]. \quad (3.17)$$

Реактивная мощность, возникающая в индукторе, равна, кВ·А,

$$Q_{\text{и}} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_{\text{и}} h \sqrt{\rho_{\text{и}} f} \cdot k_{\text{и},Q} \frac{1}{k_3}. \quad (3.18)$$

Настил тока  $I\omega$  можно найти из выражения (3.19), А/м, в котором известны все величины

$$I\omega = \frac{400}{k_{\text{мр}}} \sqrt{\frac{P_{\text{м}}}{d_o h \sqrt{\rho_{\text{м}} \mu_{\text{м}} f} \cdot k_{\text{мр}}}}, \quad (3.19)$$

где  $P_{\text{м}}$  – мощность, выделяемая в металле, кВт.

Подставив полученное значение настила тока в индукторе в формулы (3.15)–(3.18) можно определить значения активных и реактивных мощностей  $P_{\text{и}}$ ,  $Q_{\text{м}}$ ,  $Q_{\text{з}}$ ,  $Q_{\text{и}}$ , а также суммарную активную  $P_{\text{и.п.}}$ , кВт, реактивную  $Q_{\text{и.п.}}$ , кВ·А, и полную мощность  $S$ , потребляемую установкой,

$$P_{\text{и.п.}} = P_{\text{м}} + P_{\text{и}}, \quad (3.20)$$

$$Q_{\text{и.п.}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{з}} + Q_{\text{и}},$$

$$S = \sqrt{P_{\text{и.п.}}^2 + Q_{\text{и.п.}}^2}. \quad (3.21)$$

Силу тока в индукторе, А, определяют по напряжению на его зажимах

$$I = \frac{10^3 S}{U_{\text{н}}}.$$

Число витков индуктора на 1 м его высоты при определении настила тока в индукторе составляет

$$\omega_{1,0} = \frac{(I\omega)}{I}. \quad (3.22a)$$

Полное число витков индуктора определяется по выражению, витки,

$$\omega = \omega_{1,0} h_{\text{и}}. \quad (3.22б)$$

Число витков, присоединяемых к источнику питания, принимают

$$\omega_{\text{пр}} = \omega \frac{U_{\text{пит}}}{U_{\text{и}}}. \quad (3.22в)$$

Для автотрансформаторной схемы питания число витков индуктора, присоединенных к преобразователю, определяют по выражению (3.13).

Установленное количество витков индуктора  $\omega$  размещают равномерно по его высоте. Зазор между витками заполняют

электрической изоляцией, толщину которой принимают из расчета 10–40 В на 1 мм толщины изоляции, тогда необходимый зазор составит, мм,

$$\Delta_{\text{из}} = \frac{U_{\text{и}}}{(10 \dots 40)\omega}. \quad (3.23)$$

Минимальная толщина изоляции не должна быть менее 1,5–2,0 мм.

При шаге витка  $\tau_{\text{в}} = \frac{h_{\text{в}}}{\omega}$  и зазоре изоляции  $\Delta_{\text{из}}$  высота витка равна  $h_{\text{в}} = \tau_{\text{в}} - \Delta_{\text{из}}$ , а коэффициент заполнения индуктора составит

$$k_3 = \frac{h_{\text{в}}}{\tau_{\text{в}}} = 1 - \Delta_{\text{из}} / \tau_{\text{в}}.$$

Для индукционных тигельных печей принимают  $k_3 = 0,7 \dots 0,9$ .

Толщину стенки трубки индуктора определяют из условия минимальных электрических потерь в нем

$$\Delta_{\text{тр}} \geq 1,3\Delta_{\text{из}}.$$

Зная высоту витка и толщину стенки трубки, выбирают медную трубку круглого, квадратного или специального профиля (см. рис. 3.6 на с. 110).

Электрический КПД системы «индуктор–металл» определяют с учетом выражений (3.14) и (3.15):

$$\eta_{\text{эл}} = \left( 1 + \frac{P_{\text{и}}}{P_{\text{м}}} \right)^{-1}. \quad (3.24)$$

Если фактический коэффициент заполнения  $k_3$  или значение коэффициента  $k_{\text{иР}}$  в формуле (3.3) заметно отличаются от принятых предварительно при вычислении  $P_{\text{и}}$ , то вычисляют точное значение  $P_{\text{и}}$  при фактических данных по  $k_3$ ,  $k_{\text{иР}}$  и аргумента  $\frac{2(d_o - D_{\text{и}})}{\Delta_3}$  по данным рис. 3.16.

Предельное значение электрического КПД преобразователя  $\eta_{\text{пр}}$  (при частоте тока, стремящейся к бесконечности) получают из формулы (3.24) с учетом коэффициента ослабления магнитного поля  $k_s$  в зазоре с использованием коэффициента магнитного рассеивания  $\mu$ :

$$\eta_{\text{пр}} = \left( 1 + \frac{D_{\text{и}} h_{\text{и}}}{d_o h k_s^2 k_3} \sqrt{\frac{\rho_{\text{и}}}{\rho \mu}} \right)^{-1}. \quad (3.25)$$

Естественный  $\cos \varphi$  рассчитывают с учетом формул (3.20) и (3.21) по выражению

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{и}}}{S}. \quad (3.26)$$

Емкость конденсаторной батареи  $C$ , необходимую для полной компенсации реактивной мощности  $Q_{\text{и}}$ , определяют по соотношению, кВ·А,

$$Q_{kq} = Q_{\text{и}} = U_k^2 2\pi f C \cdot 10^{-3},$$

где  $Q_{kq}$  – реактивная мощность батареи, кВ·А;

$U_k$  – напряжение на конденсаторах, В;

$C$  – емкость батареи, Ф.

Отсюда емкость батареи, мкФ,

$$C = \frac{10^9 Q_{\text{и}}}{2\pi f U_k^2}. \quad (3.27)$$

После этого выбирают тип конденсаторов и формируют способ их соединения для обеспечения установленной емкости.

#### **3.4.6. Расчет водяного охлаждения индуктора**

При работе индуктора происходит его нагрев не только за счет прохождения через него тока, но и за счет теплового потока от расплавленных материалов в тигле. Приблизленно тепловые потери через цилиндрические стенки тигля можно определить по уравнению теплопроводности в цилиндрической стенке, кВт,

$$P_{\text{т.п.}} = 7,30 \cdot 10^{-3} \pi \lambda h \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}}{\ln(D_{\text{т}}/d_o)}, \quad (3.28)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности тигля, Вт/м·град;

$T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}$  – перепад температур в стенке тигля, °С;

$D_{\text{т}}$  – наружный диаметр тигля, м.

Значение  $\lambda$  зависит от вида футеровки. Для кислой футеровки коэффициент теплопроводности равен  $\lambda = 0,75 \dots 1,00$  Вт/м·град; для основной футеровки  $\lambda = 1,50$  Вт/м·град, для нейтральной  $0,75 - 0,85$  Вт/м·град.

Полный тепловой поток, который должен быть воспринят охлаждающей индуктор водой, равен сумме тепловых потоков, отражающих электрические и тепловые потери,

$$P_{\text{п.охл}} = P_{\text{и}} + P_{\text{т.п.л}}. \quad (3.29)$$

Для предотвращения выпадения солей жесткости температура охлаждающей воды на выходе из индуктора не должна превышать 35–45 °С, а интервал ее изменения при этом составляет 20–30 °С, тогда потребное количество охлаждающей воды может быть определено по выражению, м<sup>3</sup>/ч,

$$G_{\text{охл}} = \frac{P_{\text{п.охл}} \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}) \cdot 4,19}, \quad (3.30)$$

где  $T_{\text{вых}}$  – температура выходящей из индуктора охлаждающей воды, °С.

Для проверки возможности отвода теплоты от индуктора при работе печи необходимо проверить условия теплопередачи. В этом случае количество теплоты, отводимое от индуктора, составит, кВт,

$$P_{\text{отв}} = \alpha_{\text{т}} F_{\text{охл}} (T_{\text{и}} - T_{\text{в}}), \quad (3.31)$$

где  $\alpha_{\text{т}}$  – коэффициент теплоотдачи, кВт/м<sup>2</sup>·К;

$F_{\text{охл}}$  – поверхность теплоотдачи индуктора, м<sup>2</sup>;

$T_{\text{и}}$  – температура трубки индуктора, °С. Обычно принимают  $T_{\text{и}} = 50$  °С;

$T_{\text{в}}$  – средняя температура охлаждающей воды, °С.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{т}}$  зависит от режима движения охлаждающей воды, который определяется числом Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{в}} d_{\text{тр.э}}}{\nu_{\text{в}}}, \quad (3.32)$$

где  $V_{\text{в}}$  – скорость движения охлаждающей воды, м/с;

$d_{\text{тр.э}}$  – эквивалентный внутренний диаметр трубки индуктора, м;

$\nu_{\text{в}}$  – коэффициент кинематической вязкости воды, м<sup>2</sup>/с.

При турбулентном течении воды ( $\text{Re} > 10\,000$ ) она обеспечивает полный и равномерный по сечению трубки отвод теплоты от индуктора. При ламинарном течении ( $\text{Re} < 2200$ ) вода движется без перемешивания, а ее частицы, которые не соприкасаются со стенками индуктора, нагреваются за счет теплопроводности. Это не позволяет эффективно отводить тепло от индуктора, поэтому ламинарный режим движения охлаждающей воды не используется.

Скорость движения воды в индукторе, м/с, рассчитывают из выражения, м/с,

$$V_{\text{в}} = \frac{G_{\text{охл}} \cdot 10^{-3}}{3,6 S_{\text{тр.в}}}, \quad (3.33)$$

где  $S_{\text{тр.в}}$  – площадь поперечного сечения отверстия трубки индуктора,  $\text{м}^2$ .

При использовании нескольких секций охлаждения скорость воды составляет,  $\text{м/с}$ ,

$$V_{\text{в}} = \frac{10^{-3} G_{\text{охл}}}{3,6 S_{\text{тр.в}} n_{\text{с}}}.$$

Скорость движения воды должна составлять не менее  $1,5 \text{ м/с}$ . Предварительно общее количество секций может быть установлено по выражению

$$n_{\text{с}} \geq \frac{V_{\text{в}}}{1,5}. \quad (3.34)$$

Величину эквивалентного диаметра трубки неправильной формы сечения  $d_{\text{тр.э}}$  определяют по ее площади  $S_{\text{тр.в}}$  и периметру  $\Pi_{\text{тр.в}}$ :

$$d_{\text{тр.э}} = \frac{4S_{\text{тр.в}}}{\Pi_{\text{тр.в}}}. \quad (3.35)$$

Коэффициент кинематической вязкости  $\nu_{\text{в}}$  устанавливают из таблиц при средней температуре воды  $T_{\text{в}} = \frac{T_{\text{вых}} + T_{\text{вх}}}{2}$ . Основные параметры воды приведены в табл. 3.5.

Для определения коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме движения воды используют выражение,  $\text{кДж/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ ,

$$\alpha_{\text{т.т}} = 0,023 \left( 1 + 3,54 \frac{d_{\text{тр.э}}}{D_{\text{и}} + d_{\text{тр.э}}} \right) \frac{\lambda_{\text{в}}}{d_{\text{nh}}'} \left( \frac{3600 \nu_{\text{в}}}{a_{\text{в}}} \right)^{0,43} \left( \frac{V_{\text{в}} d_{\text{тр.э}}}{\nu_{\text{в}}} \right)^{0,8}. \quad (3.36)$$

При смешанном режиме движения воды коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{т.см}}$  рассчитывают из выражения,  $\text{кДж/м}^2 \cdot \text{г} \cdot \text{град}$ ,

$$\alpha_{\text{т.см}} = \text{Nu} \frac{\lambda_{\text{в}}}{d_{\text{тр.э}}}; \quad (3.37)$$

$$\text{Nu} = K_{\text{o}} (\text{Pr}_{\text{в}})^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{в}}}{\text{Pr}_{\text{и}}} \right)^{0,25}. \quad (3.38)$$

Экспериментальная функция  $K_{\text{o}} = f(\text{Re})$  представлена на рис. 3.17.

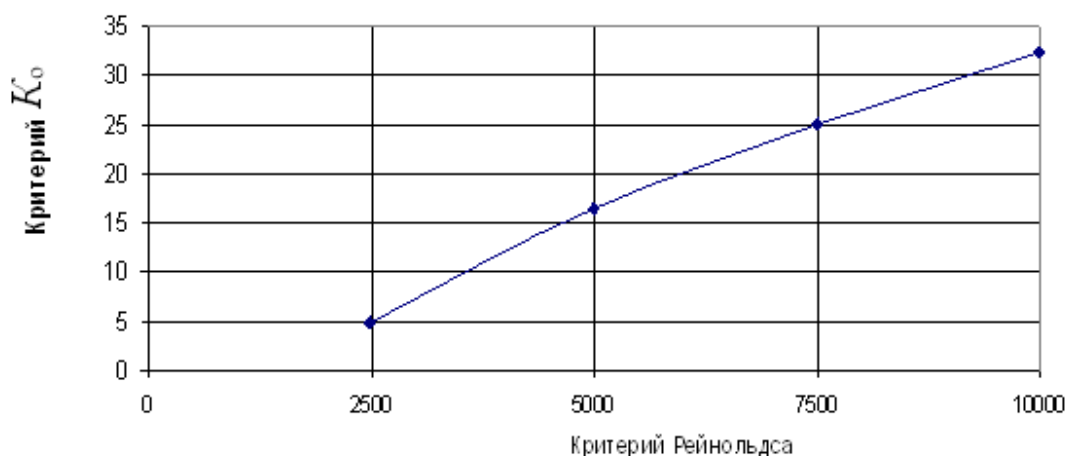


Рис. 3.17. График функции  $K_o = f(Re)$  для смешанного режима

Рассчитав по формуле (3.36) для турбулентного режима движения или определив для смешанного режима движения по табл. 3.5 значения  $Pr_v$  и  $Pr_{и}$ , находят значение критерия  $Nu$  по выражению (3.38), а затем устанавливают величину  $\alpha_{т.см}$  по формуле (3.37).

Таблица 3.5

Параметры охлаждающей воды

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , кДж/м·ч·град	Коэффициент кинематической вязкости $10^6 \nu$ , м <sup>2</sup> /с	Коэффициент температуропроводности $10^4 a$ , м <sup>2</sup> /ч	Pr
0	1,985	1,790	4,7	13,7
10	2,068	1,300	1,9	9,56
20	2,156	1,000	5,1	7,06
30	2,223	0,805	5,3	5,50
40	2,282	0,659	5,5	4,30
50	2,332	0,566	5,6	3,56
60	2,374	0,579	5,8	3,00
70	2,403	0,415	5,8	2,56
80	2,428	0,366	5,9	2,23
90	2,449	0,326	6,0	1,95

При отводе теплоты от индуктора охлаждающей водой его поверхность охлаждения составляет не более 0,40–0,45 всей внутренней поверхности трубки, тогда, м<sup>2</sup>,

$$F_{охл} = (0,40 \dots 0,45) \pi d_{тр.э} D_{и} \omega, \quad (3.39)$$

где  $\omega$  – количество витков индуктора.

При этом общее количество теплоты  $P_{\text{отв}}$ , которое необходимо отвести от индуктора, должно быть больше мощности теплового потока, поступающего от индуктора, и в виде электрических потерь в нем самом  $P_{\text{п.охл}}$ . Если  $P_{\text{отв}} < P_{\text{п.охл}}$ , то необходимо увеличить количество охлаждающей воды, протекающей через индуктор, и повторить расчет. Увеличение количества охлаждающей воды можно достичь повышением скорости ее движения. При этом изменение давления воды в индукторе рассчитывают по выражению, Па,

$$\Delta P_{\text{и}} = \left( \xi_{\text{кш}} \frac{\pi D_{\text{и}}}{d_{\text{тр.э}}} + \xi_{\text{пов}} \right) \omega \frac{V_{\text{в}}^2}{2g}, \quad (3.40)$$

где  $\xi$  – коэффициент трения, зависящий от критерия Рейнольдса;

$\xi_{\text{кш}}$  – коэффициент увеличения сопротивления, вызванный шероховатостью внутренней поверхности трубки;

$\xi_{\text{пов}}$  – коэффициент местного сопротивления;

$g$  – ускорения силы тяжести,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Следует помнить, что давление воды в системе охлаждения не превышает 2 атмосфер.

Для определения коэффициента трения  $\xi$  для гладких труб используют:

при  $2000 < \text{Re} < 10\,000$  формулу Блазиуса

$$\xi = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (3.41)$$

при  $10\,000 < \text{Re} < 300\,000$  формулу Никурадзе

$$\xi = 0,032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}}.$$

Коэффициент  $\xi_{\text{кш}}$  учитывает изменение шероховатости внутренней поверхности трубок в процессе эксплуатации. Обычно его значение лежит в пределах 1,8–2,5. Коэффициент сопротивления поворота струи  $\xi_{\text{пов}}$  при разных значениях критерия  $\text{Re}$  и отношений  $\frac{D_{\text{и}}}{d_{\text{тр.э}}}$  приведены в табл. 3.6.

Не учитывая изменения критерия Рейнольдса и коэффициента трения  $\xi$ , можно принять

$$\frac{\Delta P_{\text{ит}}}{\Delta P_{\text{ип}}} = \frac{n_{\text{сек}}^3}{m_{\text{сек}}^3},$$

где  $m_{\text{сек}}$  – необходимое количество секций охлаждения.



Таблица 3.6

Значения коэффициента сопротивления поворота струи на 360°

$\frac{D_{\text{и}}}{d_{\text{тр.э}}}$	Критерий Рейнольдса, тыс.					
	3	10	50	100	250	500
8	0,400	0,270	0,184	0,161	0,1393	0,1273
10	0,391	0,264	0,180	0,1573	0,1362	0,1246
12	0,344	0,218	0,1485	0,1298	0,1124	0,1030
15	0,294	0,198	0,135	0,118	0,1024	0,0936
20	0,254	0,1715	0,117	0,1023	0,0885	0,0812
25	0,205	0,1385	0,0945	0,0825	0,0715	0,0654
30	0,1715	0,1158	0,0789	0,069	0,0597	0,0546
40	0,1435	0,0968	0,066	0,0577	0,05	0,0457
50	0,098	0,0661	0,0451	0,0394	0,0342	0,0319

В таком случае необходимое количество секций охлаждения должно быть

$$m_{\text{сек}} \geq n_{\text{сек}} \sqrt[3]{\frac{\Delta P_{\text{ип}}}{20}}.$$

Если полученные данные существенно отличаются от первоначальных, то рекомендуется провести повторный расчет с новыми параметрами системы охлаждения.

#### **3.4.7. Энергетический баланс индукционной плавильной печи**

По значению выделяемых мощностей и потерь в печи можно установить приближенный энергетический баланс, в котором мощность, забираемая индукционной установкой из сети,  $P_c$  расходуется следующим образом:

$$P_c = P_{\text{пол}} + P_{\text{т.п.}} + P_{\text{и}} + P_{\text{экр}} + P_{\text{к.б}} + P_{\text{тпр}} + P_{\text{п.пр}},$$

где  $P_{\text{к.б}}$  – электрические потери в конденсаторной батарее;

$P_{\text{тпр}}$  – электрические потери в токопроводе;

$P_{\text{экр}}$ ,  $P_{\text{п.пр}}$  – электрические потери в экранах (магнитопроводы, электромагнитные экраны или кожух печи) и в источнике питания (преобразователь частоты или трансформатор).

Потери в токопроводе, соединяющем преобразователь частоты и конденсаторную батарею с печью, можно установить, зная только конструкцию, геометрические размеры токопровода и планировку печной установки. При установлении приближенного энергетического баланса принимают значение потерь в токопроводе

10–15 % активной мощности печи при наличии гибких кабелей и 1,5–2,0 % – при наличии разъемного соединения индуктора с токопроводом.

Потери в конденсаторной батарее при номинальных параметрах (частота и напряжение) указываются в каталогах в виде  $\text{tg}\delta$ . Если напряжение на обкладках конденсаторной батареи равно  $U_{\text{к.б}}$ , то величина энергетических потерь составит

$$P_{\text{к.б}} = Q_{\text{и}} \text{tg}\delta.$$

Если действительное напряжение на обкладках конденсаторной батареи  $U_{\text{к.б}}$  отличается от номинального, то действительные потери в ней составят:

$$P_{\text{к.б}} = Q_{\text{и}} \text{tg}\delta \left( \frac{U_{\text{к.д}}}{U_{\text{к.н}}} \right)^2. \quad (3.42)$$

Потери в преобразователе частоты или трансформаторе  $P_{\text{п.пр}}$  можно найти по величине его КПД  $\eta_{\text{пр}}$  (приводится в каталогах) либо вычислить по величине потерь в меди и железе:

$$P_{\text{п.пр}} = \left( \frac{1}{\eta_{\text{пр}}} - 1 \right) P_{\text{пр}}.$$

Тепловые потери печи включают в себя тепловые потери через стенки тигля  $P_{\text{п.т1}}$  (см. формулу (3.29) на с. 136), а также тепловые потери печи через верх и дно тигля  $P_{\text{п.т2}}$ . Принимаем

$$P_{\text{п.т2}} = (0,4 - 0,5) P_{\text{п.т1}}.$$

Полные тепловые потери установки (без учета лучеиспускания) равны

$$P_{\text{п.т}} = (1,4 - 1,5) P_{\text{п.т1}}. \quad (3.43)$$

По полученным данным составляют энергетический баланс установки.

### 3.5. Пример расчета индукционной тигельной печи

**Задание.** Рассчитать индукционную тигельную печь для плавки стали производительностью 7 т в сутки. Длительность плавки составляет 1 ч 10 мин, или 1,17 ч; длительность разливки и загрузки – 10 мин, или 0,17 ч. Напряжение питающей сети составляет по низкой части 380 В, по высокой – 6000 В. Мощность подстанции: на низкой стороне 2000 кВ·А; на высокой стороне 25 000 кВ·А. Частота питающей сети равна 50 Гц. Шихта состоит из стального лома размером 3–7 см.

В соответствии с табличными данными для стали: удельное сопротивление  $\rho_{20} = 10^{-7}$  Ом·м;  $\rho_k = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м;  $\rho_{пл} = 1,3 \times 10^{-6}$  Ом·м; теплосодержание при температуре разливки  $C_i = 340$  Вт·ч/кг; удельный вес расплавленной стали  $\gamma = 7,2$  кг/м<sup>3</sup>.

1. Определение геометрических размеров тигля.

Число плавов в сутки составляет по формуле (3.3) со с. 124

$$n_{\text{сут}} = \frac{24}{1,17 + 0,17} = 18 \text{ плавов.}$$

Полезная емкость тигля по уравнению (3.13) равна

$$G_T = \frac{7}{18} \cdot 0,4 \text{ т.}$$

Полезный объем тигля по формуле (3.5)

$$V_T = \frac{0,4 \cdot 10^3}{7,2 \cdot 10^3} = 5,56 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

Отношение  $d_o/h$  для современных тигельных печей составляет примерно 0,8, тогда средний диаметр тигля по уравнению (3.16) равен

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,8 \cdot 5,56 \cdot 10^{-2}}{\pi}} = 0,38 \text{ м.}$$

Полезная высота тигля составляет  $h = \frac{d_o}{A} = \frac{0,38}{0,8} = 0,48 \text{ м.}$

Средняя толщина стенки тигля находится по формуле (3.7)

$$\Delta_T = 6 + 0,4 = 6,4 \text{ см} = 0,064 \text{ м.}$$

Внутренний диаметр индуктора определяется по формуле (3.8)  $D_{\text{и}} = 0,38 + 2(0,064 + 0,006) = 0,52 \text{ м.}$

Высоту индуктора  $h_{\text{и}}$  выбирают по выражению (3.9). Принимаем  $h_{\text{и}} = 1,2h = 1,2 \cdot 0,48 = 0,576 = 0,58 \text{ м.}$

2. Определение активной мощности печи.

В расчете принимаем тепловой КПД печи  $\eta_T = 0,8$ , тогда по уравнению (3.10) получаем  $P_c = \frac{7 \cdot 340}{0,86 \cdot 24 \cdot 0,8} \cdot \frac{1,17 + 0,17}{1,17} = 165 \text{ кВт.}$

3. Выбор частоты и параметров преобразователя.

Частоту тока в индукторе ориентировочно определяют по формуле (3.1) со с. 102 при параметрах  $\rho$  и  $\mu$  расплавленного металла, тогда  $\rho_{\text{пл}} = 1,3 \cdot 10^{-6}$  Ом·м;  $\mu = 1,0$ .

$$f = 2,5 \cdot 10^7 \cdot \frac{1,3 \cdot 10^{-6}}{1,0 \cdot 0,38^2} = 225 \text{ Гц.}$$

Ближайшее к данному значению частоты составляет значение частоты отечественных машинных преобразователей частоты 50 Гц. Проверим значения аргумента  $\frac{\sqrt{2}r_o}{\nabla_3}$  для этой частоты в момент потери магнитных свойств, когда шихта еще образовала сплошной цилиндр. Для этих условий ( $\mu = 1,0$ ;  $\rho = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·см;  $d_o \text{ ср} = 0,05$  м) – средний размер кусков шихты. По выражению (3.2) глубина проникновения тока составляет

$$\nabla_3 = 5,03 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{\frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{1,0 \cdot 500}} = 2,36 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Значение аргумента  $\frac{\sqrt{2}r_o}{\nabla_3}$  определяется как

$$\frac{\sqrt{2}r_o}{\nabla_3} = \frac{2,5 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{2}}{2,36 \cdot 10^{-2}} = 1,5 \leq 3,0.$$

Таким образом, частота 500 Гц не обеспечивает расплавления шихты, потерявшей магнитные свойства.

Найдем величину минимальной частоты для этого периода плавки из условий (3.11) со с. 127

$$f_{\text{мин}} \geq 4,54 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{1,0 \cdot (5,0 \cdot 10^{-2})^2} = 2000 \text{ Гц.}$$

Ближайшая частота машинных преобразователей равна 2500 Гц. Эту частоту и выбираем для проектируемой печи.

Необходимая активная мощность преобразователя частоты определяется по формуле (3.12)  $P_{\text{пр}} = 1,3 \cdot 165 = 215$  кВт. Из отечественных машинных преобразователей частоты наиболее подходящим по мощности является преобразователь с генератором типа ВГО-250-2500 мощностью 250 кВт, частотой вырабатываемого тока 2500 Гц, напряжением на выходе 1500/750 В, КПД генератора  $\eta_{\text{ген}} = 0,815$  и электродвигателем типа КАМО-350-2 мощностью 350 кВт, напряжением 6000/3000В, 2900 об/мин, КПД  $\eta_{\text{дв}} = 0,927$ .

4. Электрический расчет печи.

Для определения настила тока индуктора по формуле (3.19) вычислим отношение диаметра садки к глубине проникновения тока в горячем режиме работы печи

В соответствие с формулой (3.7)

$$\Delta_3 = 503 \cdot \sqrt{\frac{1,3 \cdot 10^{-6}}{1,0 \cdot 2500}} = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

В таком случае  $\frac{d_o}{\Delta_3} = \frac{0,38}{1,15 \cdot 10^{-2}} = 33,0 ? 10$ . В соответствии с данными рис. 3.14 поправочные коэффициенты  $k_{mp}$  и  $k_{mq}$  равны единице и  $P_c = Q_c$ . Для геометрических соотношений данного расчета  $\frac{h_{и}}{h} = \frac{0,58}{0,48} = 1,21$ ;  $\frac{D_{и}}{h_{и}} = \frac{0,52}{0,48} = 0,89$ ;  $\frac{d_o - \Delta_3}{h} = \frac{0,38 - 1,15 \cdot 10^{-2}}{0,48} = 0,77$ .

Из данных рис. 3.15 получаем  $K'_{mp} = 0,91$ . С учетом поправки  $\Delta K_{mp} = \frac{3}{4} \frac{1}{(d_o/\Delta_3) - 1} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{33,0 - 1} = 0,024$  коэффициент магнитного рассеивания составит  $K_{mp} = 0,91 + 0,024 = 0,93$ .

Настил тока определяем по формуле (3.19)

$$I\omega = \frac{400}{0,93} \cdot \sqrt{\frac{165}{0,38 \cdot 0,48 \cdot \sqrt{1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 2500 \cdot 1,0}}} = 5,42 \cdot 10^4 \text{ А / м}^2.$$

Реактивная мощность в металле численно равна активной мощности в нем, т. е.  $Q_m = 165 \text{ кВт} \cdot \text{А}$ .

Реактивную мощность в зазоре определяем по формуле (3.17)

$$Q_3 = 6,2 \cdot 10^{-9} \cdot (5,42 \cdot 10^4)^2 \cdot 2500 \cdot 0,38^2 \cdot 0,48 \cdot \left[ \left( \frac{0,52}{0,38} \right)^2 - 1 \right] = 2754 \text{ кВт} \cdot \text{А}.$$

Для определения активной и реактивной мощности в индукторе задаемся величиной коэффициента заполнения  $K_3 = 0,86$ . По данным рис. 3.16 находим величины  $K_{ир}$  и  $K_{иQ}$  при толщине индуктора, выбранной из условий минимума электрических потерь,

$$\Delta_{и} = \frac{1}{2} \pi \Delta_{Эи} = \frac{1}{2} \pi \cdot 503 \cdot \sqrt{\frac{2,0 \cdot 10^{-8}}{1,0 \cdot 2500}} = 2,23 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Принимая  $\rho_{и} = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , получаем  $\frac{D_{и}}{\Delta_3} = \frac{0,58}{2,23 \cdot 10^{-3}} = 259,53 > 10$

В таком случае  $K_{\text{ир}} = K_{\text{и}Q} = 1,0$  и  $P_{\text{и}} = Q_{\text{и}}$ . В соответствии с формулой (3.15)

$$P_{\text{и}} = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot (5,42 \cdot 10^4)^2 \cdot \frac{0,52}{0,86} \cdot 0,58 \cdot \sqrt{2,0 \cdot 10^{-8} \cdot 2500} \cdot 1,0 = 45,16 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{и}} = 45,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Общая активная мощность системы «индуктор–металл» равна  $P = P_{\text{с}} + P_{\text{и}} = 165 + 45,6 = 210,6 \text{ кВт}$ . Общая реактивная мощность системы «индуктор–металл» равна  $Q = Q_{\text{с}} + Q_3 + Q_{\text{и}} = 165 + 2754 + 45,6 = 2964,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ . Полная мощность системы «индуктор–металл» равна  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{210,6^2 + 2964,6^2} = 2972,07 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ .

Ток в индукторе может быть определен по выражению

$$I = \frac{P 10^3}{U_{\text{и}}}.$$

Номинальное напряжение конденсаторных элементов, выпускаемых отечественными заводами, для частоты 2500 Гц не превышает 1500 В; напряжение выбранного преобразователя частоты равно 1500/750 В. Поэтому при применении добавочного вывода на индукторе для возможности повышения напряжения с целью поддержать мощность печи при изменении параметров металла в процессе плавки, чтобы напряжение на индукторе не превосходило номинального напряжения конденсаторов, возможно два варианта:

а) использовать напряжение преобразователя 750 В, а конденсаторы на 1500 В;

б) выбрать напряжение преобразователя 1500 В, конденсаторы на 1000 В, соединенные попарно последовательно (рис. 3.18).

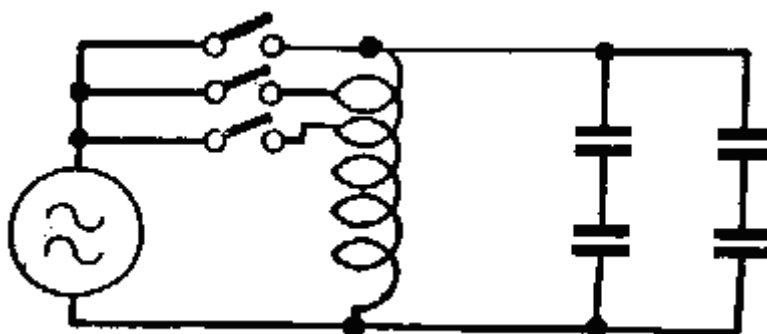


Рис. 3.18. Соединение индуктора с конденсаторной батареей и преобразователем частоты

Первый предлагаемый вариант неприемлем, поскольку ток в токопроводе при напряжении 750 В будет вдвое больше, чем при напряжении 1500 В. Это потребует установки более громоздкого и дорогого токоподвода. Для исследуемой установки выбираем второй вариант с напряжением на индукторе  $U_{\text{и}} = 2000 \text{ В}$ , конденсаторами типа ЭСВ-500-2,5 на 500 или 1000 В с соволовой изоляцией, соединенных попарно последовательно. Преобразователь частоты в первый период присоединяется к крайним виткам индуктора, а после потери магнитных свойств – к такому числу витков, при котором напряжение на полюсах индуктора не превысит 2000 В. Поэтому напряжение на индукторе в первый период  $U_{\text{и}} = U_{\text{пр}} = 1500 \text{ В}$ , а ток в индукторе составит  $I = \frac{2972 \cdot 10^3}{1500} = 1981 \text{ А}$ .

После изменения параметров шихты и потери магнитных свойств преобразователь подключается к части витков индуктора  $\omega_{\text{пр}}$ , напряжение на индукторе будет равно 2000 В, а ток, протекающий по нему, составит  $I = \frac{2972 \cdot 10^3}{2000} = 1486 \text{ А}$ . Для такого подключения удельное число витков по выражению (3.22а) составит  $\omega_{1,0} = \frac{5,42 \cdot 10^4}{1486} = 36,47 \text{ витков / м}$ . Полное число витков индуктора (3.22б) будет  $\omega = \omega_{1,0} \cdot h_{\text{и}} = 36,47 \cdot 0,58 = 21 \text{ виток}$ . Число витков, к которым присоединяется преобразователь во второй период плавки, по выражению (3.22в)  $\omega_{\text{пит}} = 21 \cdot \frac{1500}{2000} = 16 \text{ витков}$ .

Для более точной подгонки напряжения генератора к напряжению на индукторе следует предусмотреть добавочные выводы от 14, 15, 18, 19 витков. Шаг витка составит  $\tau_{\text{в}} = \frac{h_{\text{и}}}{\omega_{\text{и}}} = \frac{0,58}{21} = 0,0276 \text{ м}$ .

Изоляционный промежуток между витками найдем по выражению (3.23), задав напряжение на 1 мм зазора 20 В/мм,

$$\Delta_{\text{из}} = \frac{2000}{20 \cdot 21} = 4,75 \text{ мм}.$$

Принимаем  $\Delta_{из} = 5$  мм, тогда  $h_b = \tau_b - \Delta_{из} = 27,6 - 5 = 22,6$  мм, а действительный коэффициент заполнения составляет  $K_3 = \frac{h_b}{\tau_b} = \frac{22,6}{27,6} = 0,82$ . (Предварительно было принято  $K_3 = 0,86$ .)

Толщина трубки определяется из условия минимума потерь  $\Delta_{тр} \geq 1,3 \nabla_3$ . Если принять для меди при температуре  $50^\circ\text{C}$

$$\rho = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \text{ и } 2500 \text{ Гц, то } \Delta_3 = 503 \cdot \sqrt{\frac{2,0 \cdot 10^{-8}}{2500}} = 0,142 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

В таком случае  $\Delta_{тр} \geq 1,3 \cdot 0,142 \cdot 10^{-2} = 0,184 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 1,84 \text{ мм}$ . На основании этих данных для индуктора выбираем медную трубку диаметром 20/16 с толщиной стенки 2 мм.

Средняя по сечению трубки плотность тока составит

$$\delta_{ср} = \frac{I}{(\pi/4)(d_{тр.н}^2 - d_{тр.в}^2)} = \frac{1981}{(\pi/4)(20^2 - 16^2)} = 17,52 \text{ А / мм}^2.$$

Электрический КПД печи по формуле (3.48) составляет

$$\eta_{эл} = \left( 1 / \left( 1 + \frac{49,5}{165} \right) \right) = 0,769.$$

Для сравнения определим значение предельного электрического КПД по выражению (3.25)

$$\eta_{пр} = \left( 1 + \frac{0,52 \cdot 0,58}{0,38 \cdot 0,48 \cdot 0,925^2 \cdot 0,82} \cdot \sqrt{\frac{2,0 \cdot 10^{-8}}{1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0}} \right)^{-1} = 0,774.$$

Естественный cosφ определяем по выражению (3.26)

$$\cos \varphi = \frac{210,6}{2972,07} = 0,0708.$$

Емкость конденсаторной батареи по формуле (3.27)

$$\text{составляет } C = \frac{2964,6 \cdot 10^9}{2\pi \cdot 2500 \cdot 1000^2} = 188,82 \text{ мкФ. Тип конденсаторов}$$

был выбран заранее – ЭСВ-500-2,5. Реактивная мощность каждого конденсатора составляет 220 кВ·А. Каждая из четырех секций конденсатора имеет емкость 14 мкФ и рассчитана на 500 В. При 1000 В секции соединяются попарно последовательно. При этом их общая емкость составит  $C_1 = 2 \cdot 14 \cdot \frac{1}{2} = 14 \text{ мкФ}$ . Потребное

$$\text{количество конденсаторных элементов равно } n_k = \frac{C}{C_1} = \frac{188,73}{14} \approx 14 \text{ шт.}$$



С учетом запаса (2 шт.) принимаем  $n_k = 16$  шт. с емкостью батареи  $16 \cdot 14 = 224$  мкФ.

#### 5. Расчет охлаждения индуктора.

Потери теплоты, удаляемые охлаждающей водой, которая циркулирует в индукторе, состоят из активных потерь  $P_{\text{и}}$  и теплоты вследствие теплопроводности от горячей садки к индуктору.

Для заданного металлургического процесса принимаем кислую футеровку, для которой коэффициент теплопроводности находится в пределах  $0,75\text{--}1,00$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Для средней температуры принимаем  $\lambda = 0,875$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Перепад температур по сечению стенки тигля составляет  $1350$  °С. В соответствии с формулой (3.28) тепловые потери составляют:

$$P_{\text{т.п.}} = 7,30 \cdot 10^{-3} \pi \cdot 0,875 \cdot 0,48 \cdot \frac{1350}{\ln(0,52/0,38)} = 13,21 \text{ кВт}$$

Электрические потери в индукторе равны  $P_{\text{и}} = 49,5$  кВт.

Полные тепловые потери на охлаждение по выражению (3.29) составляют  $P_{\text{п.ох}} = P_{\text{и}} + P_{\text{т.п.}} = 49,5 + 13,21 = 62,71$  кВт.

Необходимое количество охлаждающей воды по уравнению (3.30)

$$G_{\text{охл}} = \frac{62,71 \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{(40 - 15) \cdot 4,19} = 2,16 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Проверяем, какое количество тепла может отвести охлаждающая вода. Для определения режима движения рассчитаем критерий Рейнольдса по выражению (3.32)  $Re = \frac{V_{\text{в}} d_{\text{тр.э}}}{\nu_{\text{в}}}.$

Действительная скорость  $V_{\text{в}}$  воды в индукторе по формуле (3.33) при одной секции охлаждения в индукторе и сечении  $S_{\text{тр. в}}$

$$S_{\text{тр. в}} = \frac{\pi d_{\text{тр. в}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 201 \text{ мм}^2 = 2,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$V_{\text{в}} = \frac{2,16 \cdot 10^{-3}}{3,6 \cdot 2,01 \cdot 10^{-4}} = 2,98 \text{ м / с}.$$

Ориентировочно находим число секций охлаждения индуктора по выражению (3.34)  $n_{\text{сек}} = \frac{2,86}{1,5} \approx 2$  секции, тогда скорость воды

в каждой секции составит  $V_{\text{сек}} = \frac{V_{\text{в}}}{n_{\text{сек}}} = \frac{2,86}{2} = 1,43 \text{ м / с}.$

Значение кинематической вязкости воды выбираем из табл. 3.5 для средней температуры  $T_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2} = \frac{40 + 15}{2} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\nu_{\text{в}} = 8,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Эквивалентный внутренний диаметр трубки круглого сечения равен действительному внутреннему диаметру  $d_{\text{тр.э}} = d_{\text{тр.в}} = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м}$  (для профилированных трубок эквивалентный диаметр определяем по формуле (3.35)).

В соответствии с полученными данными  $\text{Re} = \frac{1,43 \cdot 0,016}{8,4 \cdot 10^{-7}} = 27\,238$ , что соответствует турбулентному движению.

Коэффициент теплоотдачи рассчитаем по формуле (3.36), а значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda_{\text{в}}$  и температуропроводности  $a_{\text{в}}$  выбираем по табл. 3.5 при температуре  $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $\lambda_{\text{в}} = 2,21 \text{ кДж/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ ;  $a_{\text{в}} = 5,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{ч}$ ;

$$\alpha_{\text{т.т}} = 0,023 \cdot \left( 1 + 3,54 \cdot \frac{0,016}{0,52 + 0,016} \right) \cdot \frac{2,1}{0,016} \cdot \left( \frac{3600 \cdot 8,4 \cdot 10^{-7}}{5,26 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,43} \times \\ \times \left( \frac{1,43 \cdot 0,016}{8,4 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} = 25\,001,36 \text{ кДж} / \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Количество теплоты, которое может быть отведено от индуктора охлаждающей водой, определяем по выражению (3.31). Поверхность теплоотдачи  $F_{\text{охл}}$  вычисляем по формуле (3.39)

$$F_{\text{охл}} = 0,425\pi \cdot 0,016\pi \cdot 0,52 \cdot 21 = 0,732 \text{ м}^2.$$

По уравнению (3.56)  $P_{\text{отв}} = 25\,001,36 \cdot 0,732 \cdot (50 - 28) = 402\,621,901 \text{ кДж/ч} = 111,84 \text{ кВт}$ . Это значение существенно превышает действительные потери теплоты  $P_{\text{п.охл}} = 62,71 \text{ кВт}$ .

Проверим потерю напора в индукторе с учетом турбулентного характера движения воды по формуле (3.40).

Коэффициент трения  $\xi$  при турбулентном движении вычисляем по формуле (3.41):  $\xi = \frac{0,316}{(27\,238)^{0,25}} = 0,0246$ .

Коэффициент увеличения трения вследствие шероховатости внутренней поверхности трубок  $K_{\text{ш}}$  принимаем равным 2,5. Коэффициент сопротивления повороту струи  $\xi_{\text{пов}}$  для критерия

Рейнольдса  $Re = 27\,238$  и  $\frac{D_{\text{и}}}{d_{\text{тр.э}}} = \frac{0,52}{0,016} = 32,5$  по табл. 3.6

устанавливаем  $\xi_{\text{пов}} = 0,094$ , тогда по выражению (3.40) получаем

$$\Delta P_{\text{и}} = \left( 0,0246 \cdot 2,5 \cdot \frac{\pi \cdot 0,52}{0,016} + 0,094 \right) \cdot 21 \cdot \frac{1,43^2}{2 \cdot 9,81} = 13,94 \text{ мм вод. ст.}$$

Это значение меньше максимально допустимого значения 20 мм вод. ст., поэтому принятое число секций индуктора  $n_{\text{сек}} = 2$  правильно.

#### 6. Энергетический баланс.

Электрические потери в индукторе уже определены и составляют  $P_{\text{и}} = 49,5$  кВт.

Потери в токопроводе принимаем равными 15 % активной мощности (предполагая, что соединение печи с токоподводом осуществляется гибкими проводами  $P_{\text{п.т.п.}} = 0,15 \cdot 210,6 = 31,59$  кВт).

Потери тепла в конденсаторной батарее определяем по выражению (3.42); для выбранных конденсаторов типа ЭСВ-500-2,5 по каталогам  $\text{tg} \delta = 0,003$ , т. е.

$$P_{\text{к.б.}} = 2964,6 \cdot 0,003 \cdot \left( \frac{2000}{2 \cdot 1000} \right)^2 = 8,89 \text{ кВт.}$$

Тепловые потери печи по формуле (3.43)  $P_{\text{т.п.}} = 1,45 \cdot 13,21 = 19,15$  кВт.

Активная мощность, забираемая от преобразователя, составит  $P_{\text{пр}} = P_{\text{с}} + P_{\text{и}} + P_{\text{к.б.}} + P_{\text{т.п.}} = 165 + 49,5 + 8,89 + 31,59 = 254,98$  кВт.

Потери в преобразователе при его КПД  $\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{ген}} \eta_{\text{дв}} = 0,815 \cdot 0,927 = 0,756$  составляют  $P_{\text{п.пр}} = P_{\text{пр}} \left( \frac{1}{\eta_{\text{пр}}} - 1 \right) = 254,98 \cdot \left( \frac{1}{0,756} - 1 \right) = 82,29$  кВт.

Активная мощность, забираемая преобразователем из сети, составляет

$$P_{\text{с.}} = P_{\text{пр}} + P_{\text{п.пр}} = 254,98 + 82,29 = 337,27 \text{ кВт.}$$

Следует обратить внимание на то, что при номинальной мощности преобразователя 250 кВт он отдает в сеть мощность 254,98 кВт, что на  $\frac{254,98 - 250}{250} \cdot 100 = 1,99\%$  превышает

номинальную. Однако это не создает опасности перегрева преобразователя. При времени полного цикла работы печи  $1,17 + 0,17 = 1,35$  ч время нагрева и плавления составляет только  $1,17 / 1,35 = 0,87$ , тогда средняя потребляемая мощность за цикл составит  $254,98 \cdot 0,87 = 221,83$  кВт.

Полученные данные сведем в энергетический баланс установки в виде табл. 3.7.

Из анализа данных табл. 3.7 можно установить:

1) потери в преобразователе частоты находятся в пределах допустимых для такого типа (23–26 %);

2) потери в токопроводе несколько велики из-за конструктивных особенностей. Наилучшие показатели соответствуют 1,0–1,5 %;

3) потери в конденсаторной батарее завышены. Обычно значение составляет 1,0–1,5 %;

4) общие тепловые потери за плавку составляют  $14,68 + 5,68 = 20,36$  %, что вполне приемлемо (20–25 %);

5) общий КПД установки составляет 43,23 %. Его значение может быть увеличено за счет улучшения конструкции агрегата.

Таблица 3.7

Сводный энергетический баланс  
индукционной плавильной печи

Расход		
Величина мощности	кВт	%
1. Потери в преобразователе $P_{п.пр}$	82,29	24,40
2. Потери в токопроводе $P_{п.тп}$	31,59	9,37
3. Потери в конденсаторной батарее $P_{к.б}$	8,89	2,64
4. Потери в индукторе $P_{и}$	49,5	14,68
5. Тепловые потери индуктора $P_{т.п}$	19,15	5,68
6. Полезно используемая мощность $P_{пол} = P_c - P_{т.п.}$	$165 - 19,15 =$ $= 145,85$	43,23
ИТОГО	337,27	100

*Примечание.* Величина мощности прихода – активная мощность из сети  $P_c$  составляет 337,27 кВт, что соответствует 100 %.

### 3.6. Планирование расположения индукционной тигельной печи

Схема расположения индукционных плавильных печей должна обеспечивать удобство ведения металлургического процесса с минимальными энергетическими затратами. Для этого

высота рабочей площадки должна допускать подведение под носок печи разливочного ковша. Для этого ее поднимают над уровнем пола (рис. 3.19).

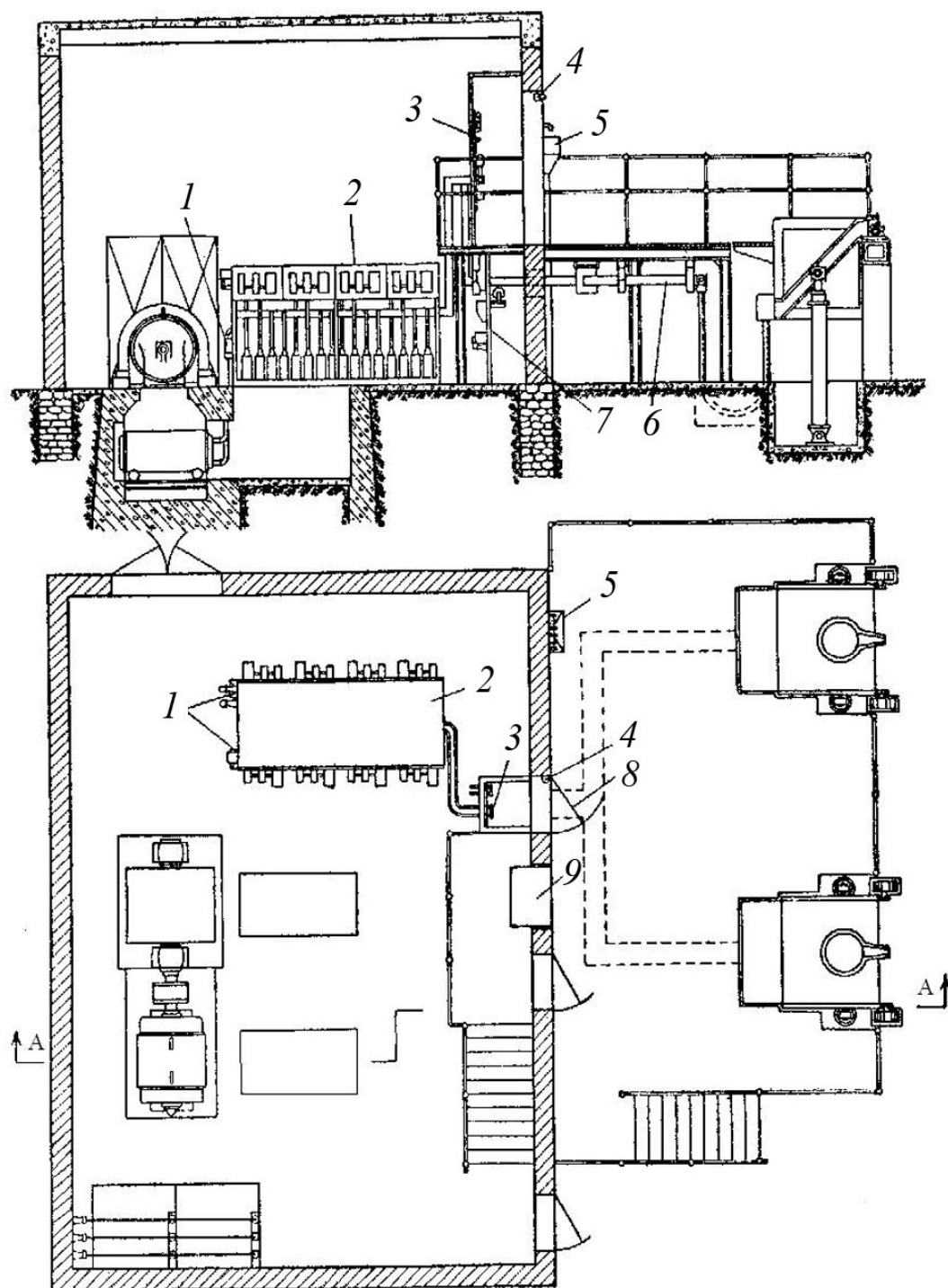


Рис. 3.19. Схема размещения индукционной плавильной тигельной печи малой мощности:

- 1 – переключатель конденсаторной батареи; 2 – конденсаторная батарея;  
 3 – щит переключения; 4 – дверной блокировочный контакт;  
 5 – сливная воронка; 6 – соединительные шины; 7 – переключатель  
 главного контактора; 8 – дверь; 9 – щит управления

Для уменьшения электрических потерь преобразователь и конденсаторную батарею необходимо располагать в непосредственной близости от печи. В современных плавильных комплексах все основное оборудование (преобразователь, пусковая аппаратура, конденсаторных батареи) размещают в отдельной преобразовательной подстанции, которая разделяется с плавильным отделением с помощью капитальной стены.

В установках большой емкости допускается размещение конденсаторной батареи в непосредственной близости от печи с условием обеспечения ее закрытого исполнения (для обеспечения безопасности обслуживающего персонала и уменьшения загрязнения).

Щит управления 9 и щит переключения печей и числа витков 3 (см. рис. 19) обычно размещают в проеме стены, отделяющей преобразовательную подстанцию от плавильного отделения так, чтобы фасады щитов были обращены к печи. При этом задние их стороны защищены от пыли и копоти.

В плавильных отделениях с печами большой мощности питаемые током промышленной частоты трансформатор и конденсаторные батареи в соответствии с «Правилами устройств электроустановок» размещают в отдельных помещениях, имеющих необходимую вентиляцию. Щит управления таких печей располагают на рабочей площадке в закрытом исполнении с возможностью доступа к задней стороне щита.

Щиты управления 9, имеющие открытые токоведущие части, во избежание аварий и несчастных случаев располагают так, чтобы в плавильном отделении размещался только пульт управления. Преобразовательные подстанции должны иметь закрывающуюся дверь 8 с блокировочным контактом, предотвращающим работу печи при открытых дверях. Переключатели, установленные на щите, могут управлять только обесточенными цепями. Для этого перед переключением либо отключают возбуждение генератора, либо размыкают главный контактор.

У печей небольшой мощности (до 100 кг) главный контактор может устанавливаться с задней стороны щита управления. На печах большой мощности главный контактор устанавливается на специальном контактном щите 7 в преобразовательной подстанции, вблизи щита переключения.

Преобразовательная подстанция должна иметь отдельный вход со стороны рабочей площадки, а также ворота на уровне пола достаточной ширины, позволяющей транспортировку оборудования при монтаже и ремонте. Кроме того, она должна иметь надежную

вентиляцию во избежание перегрева преобразователя частоты. Преобразователи с водяным охлаждением дополнительной вентиляции не требуют.

Конденсаторная батарея 2 для установок, работающих на повышенной частоте, выполняется в виде стальных шкафов. В них конденсаторы размещаются на нижней части шкафа, а на верхней монтируются контакторы для включения и отключения конденсаторов. Для обеспечения безопасности управления печью и исключения опасности пробоя конденсаторов их переключение осуществляют только на обесточенной цепи с помощью переключателя 10.

Если конденсаторные батареи имеют водяное охлаждение (токи повышенной частоты) в цепи электрического управления печью предусматривается блокировка невозможности включения конденсаторной батареи без водяного охлаждения. Сливная воронка охлаждающей воды 5 монтируется на каркасе конденсаторной батареи. Для печных установок, питаемых током промышленной частоты, конденсаторные батареи выполняются в виде отдельных блоков из 4–32 элементов, установленных на стеллажах в один или два этажа.

Токоподвод 6, соединяющий конденсаторную батарею с индуктором, выполняется в виде плоских или трубчатых (водоохлаждаемые) медных шин.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### *Обязательный*

- 1 Сарапулов Ф. Н. Введение в специальность «Электротехнологические установки и системы» : учеб. пособие /В. Ф. Сарвпулов. Екатеринбург : УГТУ, 1997. 92 с.
- 2 Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи : учеб. пособие для вузов / А. М. Вайнберг. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергия, 1967. 416 с.
- 3 Фарбман С. А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов / С. А. Фарбман, И. Ф. Колобнев. Изд. доп. и перераб. М. : Metallurgia, 1968. 496 с.
- 4 Цыганов В. А. Плавка цветных металлов в индукционных печах / В. А. Цыганов. М. : Metallurgia, 1974. 248 с.
- 5 Башенко В. В. Электроплавильные печи цветной металлургии / В. В. Башенко, А. В. Донской, И. М. Соломахин. М. : Metallurgia, 1971. 320 с.
- 6 Фомин Н. И. Электрические печи и установки индукционного нагрева / Н. И. Фомин, Л. М. Затуловский. М. : Metallurgia, 1979. 247 с.
- 7 Установки индукционного нагрева : учеб. пособие для вузов / А. Е. Слухоцкий [и др.] ; под ред А. Е. Слухоцкого. Л. : Энергоиздат, Ленинградское отд-ние, 1981. 328 с.
- 8 Индукционные печи для плавки чугуна / Б. П. Платонов [и др.]. М. : Машиностроение, 1976. 176 с.
- 9 Электротехнологические промышленные установки : учеб. для вузов / И. П. Евтюкова [и др.] ; под ред. А. Д. Свенчанского. М. : Энергоиздат, 1982. 368 с.
- 10 Болотов А. В. Электротехнологические установки : учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение промпредприятий» / А. В. Болотов, Г. А. Шепель. М. : Высш. шк., 1988. 336 с.
- 11 Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. М. : Наука, 1965. 848 с.
- 12 Промышленные цветные металлы и сплавы : справочник / А. П. Смирягин, Н. А. Смирягина, А. В. Белова. 3-е изд. доп. И перераб. М. : Metallurgia, 1974. 488 с.



13 Справочник по обработке цветных металлов и сплавов / под ред. Л. Е. Миллера. М. : Гос. науч.-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961. 872 с.

14 Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности : учеб.-справ. руководство / Л. А. Сена. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 432 с.

15 Электрооборудование и автоматика электротермических установок : справочник / А. П. Альтгаузен [и др.] ; под ред. А. П. Альтгаузена. М. : Энергия, 1978. 304 с.

16 Кацевич Л. С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических цепей : учебник / Л. С. Кацевич. М. : Энергия. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. 304 с.

17 Электротермическое оборудование : справочник / под общей ред. А. П. Альтгаузена. М. : Энергия, 1980. 416 с.

18 Фарбман С. А. Индукционные электропечи для плавки цветных металлов и сплавов / С. А. Фарбман, И. Ф. Колобнев. М. : ОНТИ, 1933. 384 с.

19 Самохвалов Г. В. Электрические печи черной металлургии / Г. В. Самохвалов, Г. И. Черныш. М. : Металлургия, 1984. 232 с.

20 Брокмайер К. Индукционные плавильные печи / К. Брокмайер ; пер. с нем. ; под ред. Шевцова М. А. и Столова М. Я. М. : Энергия, 1972. 304 с.

### ***Рекомендуемый***

Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г. И. Бабат. Л. : Энергия, 1965. 552 с.

Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи : учеб. пособие для вузов / А. М. Вайнберг. М. : Энергия, 1967. 416 с.

Егоров А. В. Электрические печи (для производства сталей) / А. В. Егоров, А. Ф. Моржин. М. : Металлургия, 1975. 352 с.

Основы теории теплогенерации : учеб. для вузов / М. Д. Казяев [и др.]. Екатеринбург : УГТУ, 1999. 285 с.

Проектирование электрических машин : учеб. пособие для вузов / И. П. Копылов [и др.] ; под ред. И. П. Копылова. М. : Энергия, 1980. 496 с.

Сасса В. С. Футеровка индукционных плавильных печей и миксеров / В. С. Сасса. М. : Энергоатомиздат, 1983. 120 с.

Сасса В. С. Футеровка индукционных электропечей / В. С. Сасса. М. : Metallurgia, 1989. 231 с.

Теория, конструкция и расчеты металлургических печей / под науч. ред. В. А. Кривандина. М. : Metallurgia, 1986. Т. 2. 376 с.

Фарбман С. А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов / С. А. Фарбман, И. Ф. Колобнев. М. : НТО ЧиЦМ, 1958. 704 с.

Электрические конденсаторы и конденсаторные установки : справочник / В. П. Берзан [и др.] ; под ред. Г. С. Кучинского. М. : Энергоатомиздат, 1987. 656 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

В соответствии с учебным планом студенты металлургических специальностей выполняют курсовую работу по дисциплинам «Теплофизика», «Теплотехника», «Теплотехника и теплоэнергетика» и «Электротехнологические процессы и установки» по темам «Расчет индукционной канальной печи» или «Расчет индукционной тигельной печи».

Цель и требования к выполнению курсовой работы по указанным темам, а также варианты исходных данных приведены ниже.

*Цель курсовой работы* – пользуясь исходными данными, произвести электрический и тепловой расчеты индукционной печи.

*К исходным данным* относятся: емкость печи, вид выплавляемого металла или сплава.

*Курсовая работа* по электрическому и тепловому расчетам индукционной печи должна содержать:

- описание конструкции и принципа действия печи;
- назначение;
- достоинства и недостатки;
- электрический расчет;
- тепловой расчет;
- расчет охлаждения индуктора;
- выбор электропечного трансформатора по справочной литературе на основании расчета мощности;
- выбор конденсаторов, предназначенных для повышения  $\cos\varphi$ .

Помимо электрического, теплового расчетов и расчета охлаждения индуктора, в пояснительной записке нужно отразить назначение и применение сплава или металла, расплавляемого в данной печи, а также его химический состав.

Выбор материала индуктора и электротехнической стали печного трансформатора производится с использованием справочной литературы. Тепловой расчет и выбор материалов футеровки индукционной единицы и ванны печи базируются на материалах дисциплин теплофизика, теплотехника, теория электронагрева и материаловедение.

Пояснительная записка выполняется на формате А4 объемом 30–40 с. компьютерным набором.

Наряду с текстовыми материалами, в пояснительной записке должны быть представлены эскизы (в масштабе) индукционной единицы, индуктора, магнитопровода печного трансформатора и печного трансформатора в сборе.

ВАРИАНТЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ  
КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ  
«РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ (ТИГЕЛЬНОЙ) ПЕЧИ»

Номер варианта	Полная емкость, т печи	Металл или сплав
1	1,05	Медь марки М0
2	1,30	« « М1
3	2,50	« « 0
4	5,50	« « М0
5	1,05	Латунь Л63
6	2,50	
7	5,50	
8	1,05	Латунь марки Л80
9	1,30	« « Л70
10	2,50	« « Л80
11	5,50	« « Л70
12	1,30	Фосфористая бронза марки БрОФ2-0,25
13	2,50	
14	5,50	
15	1,30	Марганцовистая бронза марки БрМц5
16	2,50	
17	5,50	
18	0,75	
19	1,05	Алюминий марки А0
20	1,30	
21	2,5	
22	5,5	

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННЫХ КАНАЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ...5	
1.1. История развития процесса индукционного нагрева.....5	
1.2. Принцип действия индукционной канальной печи .....8	
1.3. Конструкции индукционных канальных печей.....13	
1.4. Футеровка индукционных канальных печей .....19	
1.5. Назначение индукционных канальных печей .....23	
1.6. Конструктивные особенности канальных печей для плавки различных металлов .....26	
1.7. Особенности эксплуатации индукционных канальных печей.....31	
1.8. Расположение оборудования литейной установки .....35	
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ .....38	
2.1. Определение емкости печи .....39	
2.2. Выбор формы ванны печи .....42	
2.3. Определение мощности печи .....46	
2.4. Расчет индукционной единицы.....60	
3. ИНДУКЦИОННЫЕ ТИГЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ .....98	
3.1. Физические основы индукционного нагрева в тигельных печах .....98	
3.2. Конструкция индукционных тигельных печей .....106	
3.3. Электрическая схема питания индукционных тигельных печей.....119	
3.4. Расчет и проектирование тигельных индукционных печей .....122	
3.5. Пример расчета индукционной тигельной печи .....141	
3.6. Планирование расположения индукционной тигельной печи .....151	
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	158

*Учебное издание*

**Карелов** Станислав Викторович, **Матюхин** Владимир Ильич,  
**Матюхин** Олег Владимирович и др.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ  
ИНДУКЦИОННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Редактор *И. В. Меркурьева*  
Компьютерная верстка – *В. К. Матвеев*

Подписано в печать 23.05.2014. Формат 60×90 1/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Гарнитура Times New Roman.  
Усл. печ. л. 10,25. Уч.-изд. л. 7,95. Тираж 250 экз. Заказ № 1.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Ризография НИЧ УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19  
Тел.: 8(343) 375-41-79, 375-45-13, 375-47-27

*Для заметок*



*Для заметок*

